Univers Parallèles[1 2]

Max Tegmark
Dept. of Physics, Univ. of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104; max@physics.upenn.edu
(23 Janvier 2003.)

Résumé : *J'examine les théories physiques impliquant des univers parallèles, qui forment une hiérarchie naturelle à quatre niveaux de multivers permettant une diversité progressivement croissante. Niveau I : une prédiction générique de l'inflation est un univers ergodique infini, contenant des volumes de Hubble réalisant toutes les conditions initiales — y compris une copie identique de vous-même à environ* $10^{10^{29}}$ *mètres. Niveau II : au sein de l'inflation chaotique, d'autres régions thermalisées peuvent présenter des constantes physiques, une dimensionnalité et un contenu particulaire différents. Niveau III : en mécanique quantique unitaire, les autres branches de la fonction d'onde n'apportent rien de qualitativement nouveau, ce qui est paradoxal étant donné que ce niveau a toujours été le plus controversé. Niveau IV : d'autres structures mathématiques aboutissent à des équations fondamentales de la physique différentes. La question essentielle n'est pas de savoir si des univers parallèles existent (le niveau I correspond au modèle cosmologique consensuel), mais le nombre de combien de niveaux. J'explique comment les modèles de multivers peuvent être réfutés et je soutiens qu'il existe un grave « problème de mesure » qu'il est indispensable de résoudre pour formuler des prédictions vérifiables aux niveaux II à IV.*

Existe-t-il une autre version de vous-même lisant cet article, décidant de le mettre de côté avant de terminer cette phrase ? Une personne vivant sur une planète appelée Terre, avec ses montagnes brumeuses, ses champs fertiles et ses villes tentaculaires, dans un système solaire comptant huit autres planètes. La vie de cette personne a été identique à la vôtre en tous points — jusqu'à présent, du moins, jusqu'à ce que votre décision de poursuivre votre lecture indique que vos deux vies ont divergé.

Vous trouvez sans doute cette idée étrange et invraisemblable, et je dois avouer que c'est aussi ma première réaction. Pourtant, il semble que nous devions nous y faire, puisque le modèle cosmologique le plus simple et le plus répandu aujourd'hui prédit que cette personne existe bel et bien dans une galaxie située à environ $10^{10^{29}}$ mètres d'ici. Ceci ne suppose même pas de physique moderne spéculative, mais simplement que l'espace soit infini et rempli de matière de manière assez uniforme, comme l'indiquent les récentes observations astronomiques. Votre *alter ego* n'est qu'une prédiction du modèle dit de concordance en cosmologie, lequel est en accord avec l'ensemble des observations actuelles et sert de base à la plupart des calculs et des simulations présentés lors des conférences de cosmologie. En revanche, des alternatives telles qu'un univers fractal, un univers fermé ou un univers à connexité multiple ont été sérieusement mises en difficulté par les observations.

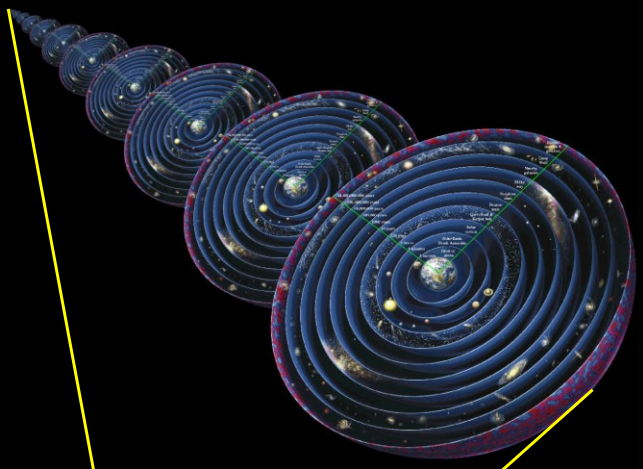
---

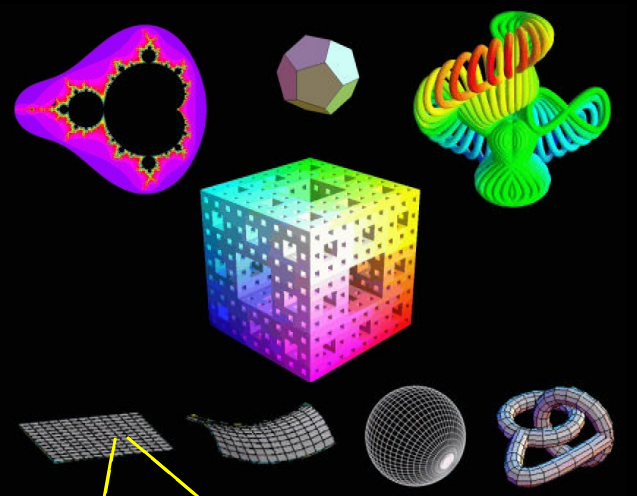
[1] Tegmark, M. (2004). Parallel universes. In J. D. Barrow, P. C. W. Davies, & C. L. Harper (Eds.), *Science and Ultimate Reality: From Quantum to Cosmos*. Cambridge University Press.
https://physics.mit.edu/faculty/max-tegmark/
https://arxiv.org/pdf/0905.1283
[2] Traduit de l'anglais par Éric Loonis.

FIG. 1. Les quatre niveaux de multivers

Niveau I : Régions au-delà de notre horizon cosmique
Caractéristiques : mêmes lois physiques, conditions initiales différentes
Hypothèses : espace infini, distribution ergodique de la matière
Preuve : - mesures du fond micro-ondes donnent un univers plat, un espace infini, une grande régularité
- c'est le modèle le plus simple

Niveau IV : autres structures mathématiques
Caractéristiques : équations fondamentales de la physique différentes
Hypothèses : existence mathématique = existence physique
Preuve : - déraisonnable efficacité des maths en physique
- réponses à la question de Wheeler/Hawking :
« Pourquoi ces équations et pas d'autres ? »





Niveau II : Autres bulles post-inflationnaires
Caractéristiques : mêmes équations fondamentales de la physiques, mais peut-être différentes constantes, particules et dimensionnalité
Hypothèses : avènement d'une inflation chaotique
Preuve : - théorie de l'inflation explique espace plat, fluctuations invariantes d'échelle, résout problème de l'horizon et celui des monopôles, peut expliquer naturellement les bulles
- explique les paramètres finement ajustés

Niveau III : Mondes multiples de la physique quantique
Caractéristiques : identiques au niveau II
Hypothèses : physique unitaire
Preuve : - support expérimental pour une physique unitaire
- correspondance AdS/CFT suggère que même la gravitation quantique est unitaire
- décohérence expérimentalement vérifiée
- modèle mathématique le plus simple

La distance maximale observable correspond à celle parcourue par la lumière au cours des 14 milliards d'années écoulées depuis le début de l'expansion du Big Bang. Les objets visibles les plus éloignés se situent actuellement à environ 4×10^{26} mètres[3] d'ici, et une sphère de ce rayon définit notre univers observable, également appelé notre *volume de Hubble*, notre *volume de l'horizon* ou tout simplement notre univers. De même, l'univers de votre jumeau mentionné plus haut est une sphère de même taille centrée là-bas, que nous ne pouvons ni voir et avec laquelle nous n'avons encore aucun contact causal. C'est l'exemple le plus simple (mais loin d'être le seul) d'univers parallèles.

Selon cette définition même de l'» univers », on pourrait s'attendre à ce que l'idée que notre univers observable ne soit qu'une infime partie d'un « multivers » plus vaste, reste à jamais du domaine de la métaphysique. Pourtant, la frontière épistémologique entre physique et métaphysique est définie par la vérifiabilité expérimentale d'une théorie, et non par son caractère étrange ou l'existence d'entités inobservables. Les avancées expérimentales permises par la technologie ont ainsi repoussé les frontières de la physique, intégrant des concepts toujours plus abstraits (et parfois contre-intuitifs) tels que la rotation de la Terre, le champ électromagnétique, le ralentissement du temps à haute vitesse, la superposition quantique, la courbure de l'espace et les trous noirs. Comme le montre cet article, il apparaît de plus en plus clairement que les modèles de multivers fondés sur la physique moderne peuvent en réalité être testés empiriquement, prédictifs et falsifiables. De fait, jusqu'à quatre types distincts d'univers parallèles (Figure 1) ont été évoqués dans la littérature scientifique récente. La question essentielle n'est donc pas de savoir s'il existe un multivers (le niveau I étant relativement incontesté), mais plutôt combien de niveaux il comporte.

I. NIVEAU I : RÉGIONS AU-DELÀ DE NOTRE HORIZON COSMIQUE

Revenons à votre jumeau lointain. Si l'espace est infini et que la matière est répartie de manière suffisamment uniforme à grande échelle, alors même les événements les plus improbables doivent se produire quelque part. En particulier, il existe une infinité d'autres planètes habitées, dont non pas une seule, mais une infinité avec des personnes ayant la même apparence, le même nom et les mêmes souvenirs que vous. En effet, il existe une infinité d'autres régions de la taille de notre univers observable, où se déroule chaque histoire cosmique possible. C'est le multivers de niveau I.

A. Preuves de l'existence d'univers parallèles de niveau I

Bien que ses implications puissent paraître extravagantes et contre-intuitives, ce modèle cosmologique d'espace infini est en réalité le plus simple et le plus répandu aujourd'hui. Il fait partie du modèle cosmologique de référence, qui concorde avec toutes les observations actuelles et sert de base à la plupart des calculs et simulations présentés lors des conférences de cosmologie. À l'inverse, des alternatives telles qu'un univers fractal, un univers fermé et un univers à connexions multiples ont été sérieusement remises en question par les observations. L'idée d'un multivers de niveau I a néanmoins suscité la controverse (une affirmation de ce type fut d'ailleurs l'une des hérésies pour lesquelles le Vatican fit brûler

[3] Après avoir émis la lumière qui nous parvient aujourd'hui, les objets les plus éloignés que nous pouvons voir se sont éloignés en raison de l'expansion cosmique et se trouvent maintenant à environ 40 milliards d'années-lumière.

Giordano Bruno sur le bûcher en 1600[4]). Alors passons en revue l'état des deux hypothèses (espace infini et distribution « suffisamment uniforme »).

Quelle est la taille de l'espace ? D'un point de vue observationnel, sa limite inférieure a considérablement augmenté (figure 2), sans qu'aucune limite supérieure n'ait été identifiée. Nous admettons tous l'existence d'objets invisibles à l'œil nu, mais que nous pourrions observer en nous déplaçant ou en attendant, comme des navires au-delà de l'horizon. Les objets situés au-delà de l'horizon cosmique ont un statut similaire, car l'univers observable s'étend d'une année-lumière chaque année, la lumière provenant de régions de plus en plus lointaines ayant le temps de nous parvenir[5]. Puisque l'on nous enseigne à l'école la notion d'espace euclidien simple, il peut donc être difficile d'imaginer comment l'espace pourrait ne pas être infini — car qu'y aurait-il au-delà du panneau disant « FIN DE L'ESPACE — ATTENTION AU VIDE » ? Pourtant, la théorie de la relativité générale d'Einstein permet à l'espace d'être fini en étant connecté différemment de l'espace euclidien, par exemple avec la topologie d'une sphère à quatre dimensions ou un tore, de sorte qu'un long voyage dans une direction puisse vous ramener en venant de la direction opposée. Le fond diffus cosmologique permet des tests précis de tels modèles finis, mais n'a jusqu'à présent apporté aucun élément en leur faveur : les modèles d'univers infini plat correspondent bien aux données et des limites strictes ont été imposées à la fois à la courbure spatiale et aux topologies à connectivité multiple. De plus, un univers spatialement infini est une prédiction générale de la théorie cosmologique de l'inflation (Garriga & Vilenkin 2001b). Les succès remarquables de l'inflation, énumérés ci-dessous, confortent donc l'idée que l'espace est, après tout, simple et infini, comme nous l'avons appris à l'école.

À quel point la distribution de la matière est-elle uniforme à grande échelle ? Dans un modèle d'» univers-île », où l'espace est infini, mais où toute la matière est confinée à une région finie, presque tous les membres du multivers de niveau I seraient inertes, ne constituant que du vide. De tels modèles ont connu une certaine popularité par le passé, initialement avec la Terre et les objets célestes visibles à l'œil nu comme île, puis, au début du XXe siècle, avec la partie connue de la Voie lactée comme île. Une autre alternative non uniforme est celle d'un univers fractal, où la distribution de la matière est autosimilaire et où toutes les structures cohérentes de la distribution cosmique des galaxies ne sont qu'une petite partie de structures cohérentes encore plus vastes. Les modèles d'univers-île et d'univers fractal ont tous deux été invalidés par des observations récentes, comme le montre la synthèse de Tegmark (2002). Les cartes de la distribution tridimensionnelle des galaxies ont révélé que la spectaculaire structure à grande échelle observée (groupes de galaxies, amas, superamas, etc.) cède la place à une uniformité terne à grande échelle, sans structures cohérentes supérieures à environ 10^{24} m. Plus précisément, imaginez placer une sphère de rayon R à divers endroits aléatoires, en mesurant la masse M incluse à chaque fois, et le calcul de la variation entre les mesures est quantifié par leur écart type ΔM. Les fluctuations relatives $\Delta M/M$ ont été mesurées comme étant de l'ordre de l'unité sur l'échelle $R \sim 3 \times 10^{23}$ m, et diminuant à plus grande échelle. Le Sloan Digital Sky Survey a constaté $\Delta M/M$ aussi petit que 1 % sur l'échelle $R \sim 10^{25}$ m. Les mesures du fond diffus cosmologique ont établi que la

[4] Les idées de Bruno ont depuis été développées par, par exemple, Brundrit (1979), Garriga & Vilenkin (2001b) et Ellis (2002), qui ont tous jusqu'à présent évité le bûcher.

[5] Si l'expansion cosmique continue de s'accélérer (question actuellement ouverte), l'univers observable finira par cesser de croître.

tendance à l'uniformité se poursuit jusqu'aux limites de notre univers observable ($R \sim 10^{27}$ m), où $\Delta M/M \sim 10^{-5}$. Hormis les théories du complot selon lesquelles l'univers serait conçu pour nous tromper, les observations sont donc sans équivoque : l'espace tel que nous le connaissons s'étend bien au-delà des limites de notre univers observable, regorgeant de galaxies, d'étoiles et de planètes.

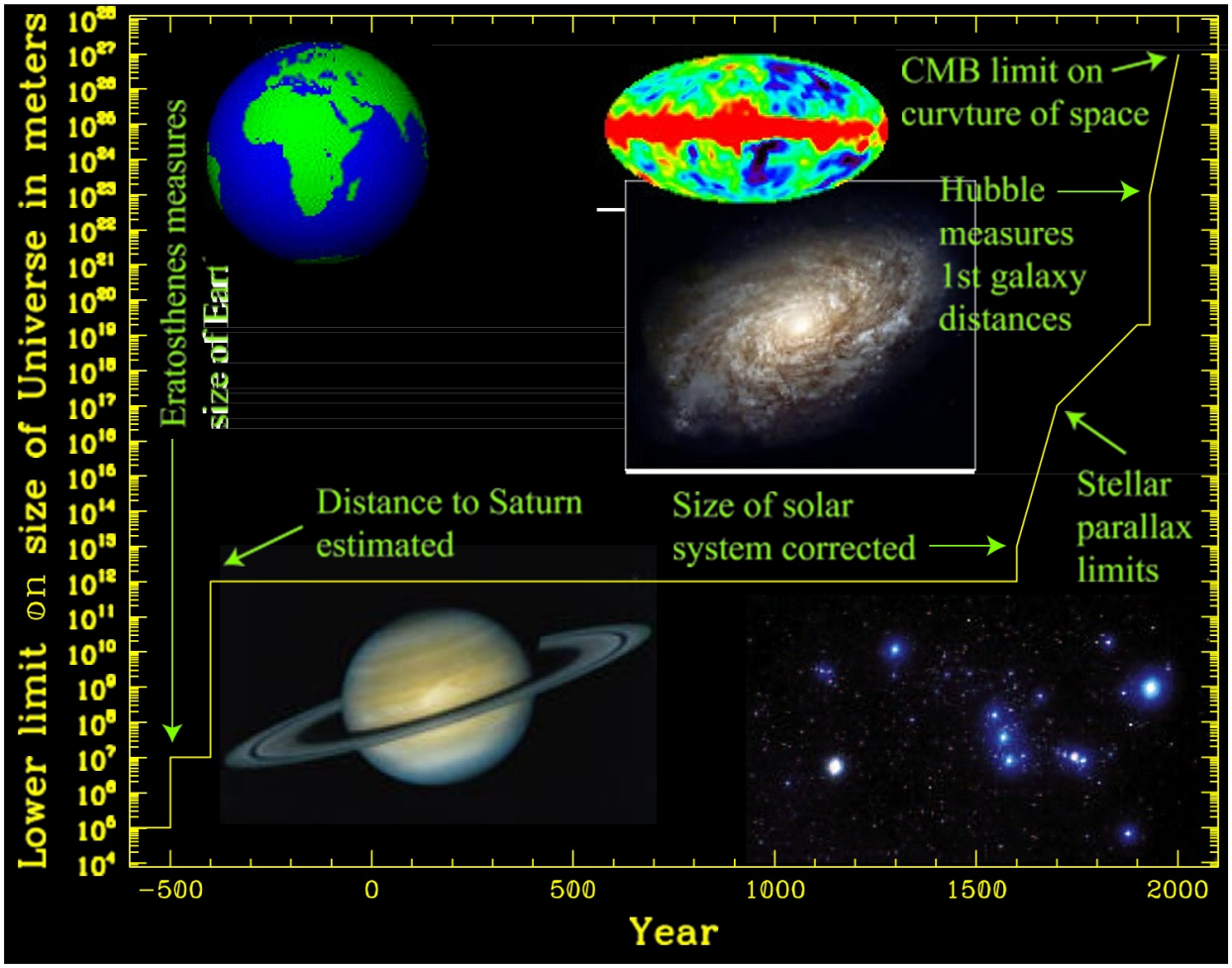


FIG. 2. Bien qu'un univers infini ait toujours été une possibilité, la limite inférieure de la taille de notre univers n'a cessé d'augmenter.

B. À quoi ressemblent les univers parallèles de niveau I ?

La description physique du monde se divise traditionnellement en deux parties : les conditions initiales et les lois de la physique qui précisent comment ces conditions initiales évoluent. Les observateurs vivant dans des univers parallèles de niveau I observent les mêmes lois de la physique que nous, mais avec des conditions initiales différentes de celles de notre volume de Hubble. La théorie actuellement privilégiée est que les conditions initiales (les densités et les mouvements des différents types de matière à leurs débuts) ont été créées par des fluctuations quantiques durant l'époque de l'inflation (voir section 3). Ce mécanisme quantique génère des conditions initiales pratiquement aléatoires, produisant des fluctuations de densité décrites par ce que les mathématiciens appellent un champ

aléatoire ergodique[6]. *Ergodique* signifie que si l'on imagine générer un ensemble d'univers, chacun avec ses propres conditions initiales aléatoires, alors la distribution de probabilité des résultats dans un volume donné est identique à celle obtenue en échantillonnant différents volumes dans un seul univers. Autrement dit, tout ce qui aurait pu se produire ici s'est en réalité produit ailleurs.
L'inflation génère en réalité toutes les conditions initiales possibles avec une probabilité non nulle, les plus probables étant quasi uniformes avec des fluctuations d'environ 10^{-5} qui sont amplifiées par regroupement gravitationnel pour former des galaxies, des étoiles, des planètes et d'autres structures. Cela signifie à la fois que presque toutes les configurations de matière imaginables se produisent dans un volume de Hubble très éloigné, et que nous devrions nous attendre à ce que notre propre volume de Hubble soit assez typique — du moins typique parmi ceux qui contiennent des observateurs. Une estimation grossière suggère que la copie identique la plus proche de vous se trouve à une distance d'environ $\sim 10^{10^{29}}$ mètres. À environ $\sim 10^{10^{91}}$ mètres de distance, il devrait exister une sphère de rayon 100 années-lumière identique à celle centrée ici, de sorte que toutes les perceptions que nous aurons au cours du siècle prochain seront identiques à celles de nos homologues là-bas. À $\sim 10^{10^{115}}$ mètres de distance, il devrait exister un volume entier de Hubble identique au nôtre[7].

Ceci soulève une question philosophique intéressante qui reviendra nous hanter dans la section VB : s'il existe effectivement de nombreuses copies de « vous » avec des vies passées et des souvenirs identiques, vous seriez incapable de calculer votre propre avenir, même en ayant une connaissance parfaite de l'état du cosmos ! La raison en est qu'il vous est impossible de déterminer laquelle de ces copies est « vous » (chacune a le sentiment de l'être). Or, leurs vies finiront généralement par différer ; vous ne pourrez donc que prédire les probabilités de ce que vous vivrez désormais. Ceci remet en cause la notion traditionnelle de déterminisme.

C. Comment une théorie du multivers peut être testée et falsifié

---

[6] À proprement parler, le champ aléatoire est ergodique si 1) l'espace est infini, 2) les fluctuations de masse $\Delta M/M$ tendent vers zéro à grande échelle (comme le suggèrent les mesures), et 3) les densités en tout point suivent une distribution de probabilité gaussienne multivariée (comme le prévoient les modèles d'inflation les plus courants, ce qui s'explique par le fait que l'équation de l'oscillateur harmonique régissant les fluctuations du champ d'inflaton donne une fonction d'onde gaussienne pour l'état fondamental). Pour le lecteur technique, les conditions 2 et 3 peuvent être remplacées par l'exigence plus faible que les fonctions de corrélation de tout ordre s'annulent à la limite d'une séparation spatiale infinie.

[7] Il s'agit d'une estimation extrêmement conservatrice, consistant simplement à compter tous les états quantiques possibles qu'un volume de Hubble peut avoir sans dépasser une température de 10^8 K. Le nombre 10^{115} correspond approximativement au nombre de protons que le principe d'exclusion de Pauli autoriserait à entasser dans un volume de Hubble à cette température (notre propre volume de Hubble ne contient qu'environ 10^{80} protons). Chacun de ces 10^{115} emplacements peut être soit occupé, soit inoccupé, ce qui donne $N = 2^{10^{115}} \sim 10^{10^{115}}$ possibilités, de sorte que la distance attendue jusqu'au volume de Hubble identique le plus proche est $N^{1/3} \sim 10^{10^{115}}$ rayons de Hubble, soit $\sim 10^{10^{115}}$ mètres. Votre copie la plus proche est probablement bien plus proche que $10^{10^{29}}$ mètres, puisque les processus de formation planétaire et d'évolution qui ont joué en votre faveur sont à l'œuvre partout. Il existe probablement au moins 10^{20} planètes habitables dans notre propre volume de Hubble.

Une théorie du multivers relève-t-elle de la métaphysique plutôt que de la physique ? Comme l'a souligné Karl Popper, la distinction entre les deux réside dans la possibilité de tester et de réfuter empiriquement la théorie. L'existence d'entités inobservables n'en fait clairement pas une théorie non vérifiable en soi. Par exemple, une théorie affirmant l'existence de 666 univers parallèles, tous dépourvus d'oxygène, prédit de manière vérifiable que nous ne devrions observer aucune trace d'oxygène dans ces univers, et est donc invalidée par l'observation.

À titre d'exemple plus sérieux, le cadre d'analyse du multivers de niveau I est couramment utilisé pour invalider des théories en cosmologie moderne, bien que cela soit rarement explicité. Par exemple, les observations du fond diffus cosmologique (FDC) ont récemment montré que l'espace est quasiment plat. Les zones chaudes et froides des cartes du FDC ont une taille caractéristique qui dépend de la courbure de l'espace, et les zones observées semblent trop grandes pour être compatibles avec le modèle de « l'univers ouvert », autrefois répandu. Cependant, la taille moyenne des zones varie légèrement et aléatoirement d'un volume de Hubble à l'autre ; il est donc important d'être statistiquement rigoureux. Lorsque les cosmologistes affirment que le modèle de l'univers ouvert est invalidé avec un niveau de confiance de 99,9 %, ils veulent dire en réalité que si ce modèle était vrai, moins d'un volume de Hubble sur mille présenterait des zones de FDC aussi grandes que celles que nous observons. Par conséquent, le modèle dans son ensemble, avec son infinité de volumes de Hubble, est invalidé, même si nous n'avons cartographié le FDC que dans notre propre volume de Hubble.

La leçon à tirer de cet exemple est que les théories du multivers peuvent être testées et falsifiées, mais seulement si elles prédisent ce que représente l'ensemble des univers parallèles et spécifient une distribution de probabilité (ou, plus généralement, ce que les mathématiciens appellent une mesure). Nous allons maintenant aborder ce problème. Comme nous le verrons dans la section VB, ce problème de mesure peut être assez sérieux et reste encore non résolu pour certaines théories du multivers.

II. NIVEAU II : AUTRES BULLES POST-INFLATIONNAIRES

Si le multivers de niveau I vous semblait vaste et difficile à appréhender, imaginez un ensemble infini de multivers distincts (chacun symbolisé par une bulle sur la Figure 1), certains avec des dimensions et des constantes physiques différentes. C'est ce que prédit la théorie chaotique de l'inflation, actuellement en vogue, que nous appellerons multivers de niveau II. Ces autres domaines sont situés à une distance infinie, au sens où vous ne pourriez jamais les atteindre, même en voyageant indéfiniment à la vitesse de la lumière. La raison en est que l'espace entre notre multivers de niveau I et ses voisins est toujours en expansion, ce qui l'étire et crée un volume croissant plus rapidement que vous ne pouvez le traverser. En revanche, vous pourriez voyager jusqu'à un univers de niveau I arbitrairement éloigné si vous étiez patient et que l'expansion cosmique ralentissait[8].

[8] Les données astronomiques suggèrent que l'expansion cosmique s'accélère actuellement. Si cette accélération se poursuit, même les univers parallèles de niveau I resteront à jamais séparés, l'espace interstellaire s'étendant plus vite que la lumière ne peut le traverser. Le débat reste cependant ouvert,

A. Preuves de l'existence d'univers parallèles de niveau II

Dans les années 1970, le modèle du Big Bang s'était révélé une explication très convaincante de la majeure partie de l'histoire de notre univers. Il expliquait comment une boule de feu primordiale s'était dilatée et refroidie, avait synthétisé l'hélium et d'autres éléments légers durant les premières minutes, était devenue transparente après 400 000 ans en émettant le rayonnement de fond cosmologique, et s'était progressivement agglomérée sous l'effet de la gravité, donnant naissance aux galaxies, aux étoiles et aux planètes. Pourtant, des questions troublantes subsistaient quant à ce qui s'était passé au tout début. Quelque chose est-il apparu à partir de rien ? Où sont passées toutes les particules superlourdes appelées monopôles magnétiques, dont la physique des particules prédit la création très tôt (le « problème des monopôles ») ? Pourquoi l'espace est-il si vaste, si ancien et si plat, alors que les conditions initiales classiques prévoient une augmentation de la courbure au fil du temps et une densité tendant vers zéro ou l'infini après un ordre de grandeur de 10^{-42} secondes (le « problème de la platitude ») ? Quel complot a fait en sorte que la température du CMB soit presque identique dans des régions de l'espace qui n'ont jamais été en contact causal (le « problème de l'horizon ») ? Quel mécanisme a généré les fluctuations de niveau 10^{-5} à partir desquelles toute la structure a grandi ?

Un processus connu sous le nom d'inflation peut résoudre tous ces problèmes d'un seul coup (voir les synthèses de Guth & Steinhardt 1984 et Linde 1994) et s'est ainsi imposé comme la théorie la plus populaire des premiers événements de l'Univers. L'inflation est un étirement rapide de l'espace, diluant les monopôles et autres débris, rendant l'espace plat et uniforme comme la surface d'un ballon qui se gonfle, et transformant les fluctuations quantiques du vide en fluctuations de densité macroscopiquement importantes, capables d'amorcer la formation des galaxies. Depuis sa formulation, la théorie de l'inflation a été validée par d'autres tests : les observations du fond diffus cosmologique (CMB) ont révélé que l'espace est extrêmement plat et ont mesuré que les fluctuations initiales présentent un spectre quasi invariant d'échelle, sans composante d'onde gravitationnelle significative, ce qui concorde parfaitement avec les prédictions de l'inflation.

L'inflation est un phénomène général qui se produit dans une vaste classe de théories des particules élémentaires. Dans le modèle populaire connu sous le nom d'inflation chaotique, l'inflation s'achève dans certaines régions de l'espace, permettant l'apparition de la vie telle que nous la connaissons, tandis que les fluctuations quantiques provoquent une inflation encore plus rapide dans d'autres régions. En substance, une bulle d'inflation en engendre d'autres, qui à leur tour en produisent d'autres, dans une réaction en chaîne sans fin (figure 1, en bas à gauche, le temps augmentant vers le haut). Les bulles où l'inflation s'est arrêtée constituent les éléments du multivers de niveau II. Chacune de ces bulles est infinie en taille[9], pourtant il existe une infinité de bulles, puisque la réaction en chaîne ne s'arrête

---

certains modèles populaires prédisant que l'expansion de l'univers finira par s'arrêter et qu'il pourrait même se contracter à nouveau.

[9] Étonnamment, il a été démontré que l'inflation peut produire un multivers de niveau I infini, même dans une bulle de volume spatial, grâce à un effet selon lequel les directions spatiales de l'espace-temps se courbent vers la direction (infinie) du temps (Bucher & Spergel 1999).

jamais. En effet, si cette croissance exponentielle du nombre de bulles dure depuis toujours, il existera une infinité non dénombrable d'univers parallèles de ce type (la même infinité que celle attribuée à l'ensemble des nombres réels, par exemple, qui est plus grande que celle de l'ensemble [dénombrable] des entiers). Dans ce cas, il n'y a ni commencement du temps ni Big Bang absolu : il y a, il y a eu et il y aura toujours une infinité de bulles en expansion et de régions post-inflationnaires semblables à celle que nous habitons, formant une structure fractale.

B. À quoi ressemblent les univers parallèles de niveau II ?

L'opinion dominante est que la physique que nous observons aujourd'hui n'est qu'une limite de basse énergie d'une théorie beaucoup plus symétrique qui se manifeste à des températures extrêmement élevées. Cette théorie fondamentale sous-jacente pourrait être à 11 dimensions, supersymétrique et impliquer une grande unification des quatre forces fondamentales de la nature. Une caractéristique commune à ces théories est que l'énergie potentielle du ou des champs à l'origine de l'inflation présente plusieurs minima différents (parfois appelés « états de vide »), correspondant à différentes manières de briser cette symétrie et, par conséquent, à différentes physiques de basse énergie. Par exemple, toutes les dimensions spatiales sauf trois pourraient être repliées sur elles-mêmes (« compactifiées »), aboutissant à un espace effectivement tridimensionnel comme le nôtre, ou un nombre réduit de dimensions pourrait se replier, laissant un espace à 7 dimensions. Les fluctuations quantiques à l'origine de l'inflation chaotique pourraient provoquer différentes brisures de symétrie dans différentes bulles, ce qui expliquerait que différents membres du multivers de niveau II possèdent des dimensions différentes. De nombreuses symétries observées en physique des particules résultent également de la manière spécifique dont la symétrie est brisée ; il pourrait donc exister des univers parallèles de niveau II où il y aurait, par exemple, deux générations de quarks au lieu de trois.

Outre des propriétés discrètes telles que la dimensionnalité et les particules fondamentales, notre univers est caractérisé par un ensemble de nombres sans dimension appelés *constantes physiques*. Le rapport de masse électron/proton en est un exemple, $m_p/m_e \approx 1836$, ainsi que la constante cosmologique, qui semble être d'environ 10^{-123} en unités dites de Planck. Il existe des modèles où ces paramètres continus peuvent également varier d'une bulle post-inflationniste à l'autre[10].

Le multivers de niveau II est donc susceptible d'être plus diversifié que le multivers de niveau I, contenant des domaines où non seulement les conditions initiales diffèrent, mais peut-être aussi la dimensionnalité, les particules élémentaires et les constantes physiques.

---

[10] Bien que les équations fondamentales de la physique soient les mêmes dans tout le multivers de niveau II, les équations effectives approximatives qui régissent le monde de basse énergie que nous observons diffèrent. Par exemple, en passant d'un espace tridimensionnel à un espace quadridimensionnel (non compactifié), on constate des différences. Cela modifie l'équation de la force gravitationnelle observée, qui passe d'une loi en carré inverse à une loi en cube inverse. De même, une rupture différente des symétries fondamentales de la physique des particules modifie l'alignement des particules élémentaires et les équations effectives qui les décrivent. Cependant, nous réserverons les termes « équations différentes » et « lois de la physique différentes » au multivers de niveau IV, où ce sont les équations fondamentales, et non les équations effectives, qui changent.

Avant de poursuivre, revenons brièvement sur quelques notions de multivers étroitement liées. Premièrement, si un multivers de niveau II peut exister, se reproduisant éternellement selon un motif fractal, alors il pourrait fort bien exister une infinité d'autres multivers de niveau II totalement déconnectés. Cependant, cette variante semble impossible à vérifier, car elle n'ajouterait aucun monde qualitativement différent ni ne modifierait la distribution de probabilité de leurs propriétés. Toutes les conditions initiales possibles et les brisures de symétrie sont déjà réalisées au sein de chacun d'eux.

Une idée proposée par Tolman et Wheeler, et récemment développée par Steinhardt et Turok (2002), est que le multivers (de niveau I) est cyclique, traversant une série infinie de Big Bangs. S'il existe, l'ensemble de ces incarnations formerait également un multivers, dont la diversité serait sans doute comparable à celle du niveau II.

Une idée proposée par Smolin (1997) repose sur un ensemble d'univers d'une diversité similaire à celle des univers de niveau II, mais où de nouveaux univers se forment par le biais de trous noirs plutôt que durant l'inflation. Ceci prédit une forme de sélection naturelle favorisant les univers à production maximale de trous noirs.

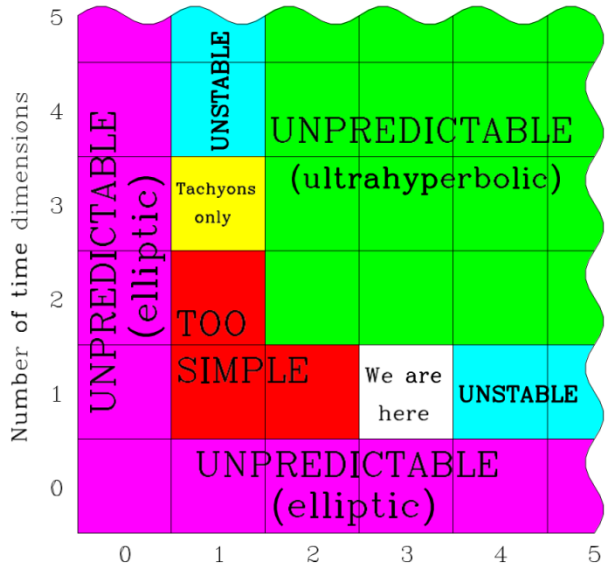


FIG. 3. Pourquoi nous ne devrions pas être surpris de nous trouver dans un espace-temps à 3+1 dimensions. Lorsque les équations différentielles partielles de la nature sont elliptiques ou ultra-hyperboliques, la physique n'a aucun pouvoir prédictif pour un observateur. Dans les cas restants (hyperboliques), $n > 3$ n'admet pas d'atomes stables et $n < 3$ peut manquer de complexité suffisante pour des observateurs (pas d'attraction gravitationnelle, problèmes topologiques). D'après Tegmark (1997).

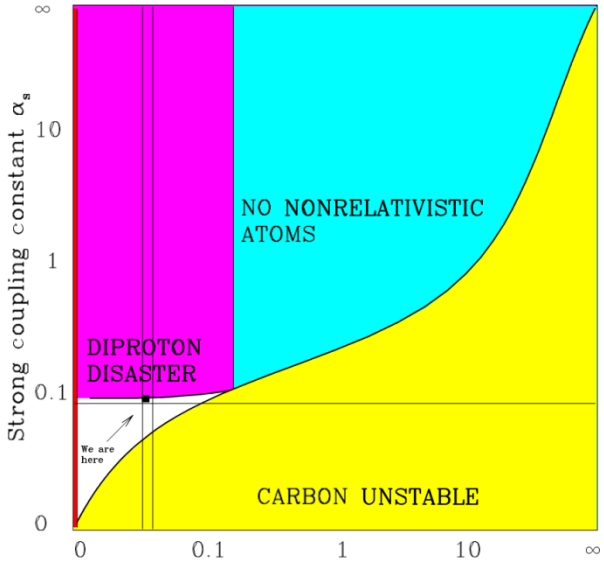


FIG. 4. Indices d'ajustement fin pour les paramètres α et αs qui déterminent respectivement l'intensité de la force électromagnétique et de la force nucléaire forte (d'après Tegmark, 1997). Les valeurs observées $(\alpha, \alpha_s) \approx (1/137, 0{,}1)$ sont indiquées par un carré plein. Les théories de grande unification excluent tout sauf la bande étroite comprise entre les deux lignes verticales, et le deutérium devient instable au-dessous de la ligne horizontale. Dans la mince région ombrée tout à gauche, l'électromagnétisme est plus faible que la gravité et donc négligeable.

Dans le cadre des scénarios de mondes-branes, un autre monde tridimensionnel pourrait être littéralement parallèle au nôtre, simplement décalé dans une dimension supérieure. Cependant, il est difficile de déterminer si un tel monde (« brane ») mérite d'être qualifié d'univers parallèle distinct du nôtre, car nous pourrions interagir avec lui gravitationnellement, à l'instar de notre interaction avec la matière noire.

C. Effets de réglage fin et de sélection

Les physiciens n'apprécient guère les coïncidences inexpliquées. Ils les interprètent en effet comme la preuve que certains modèles sont invalidés. Dans la section IC, nous avons vu comment le modèle de l'univers ouvert a été invalidé avec un niveau de confiance de 99,9 %, car il implique que le schéma observé des fluctuations du fond diffus cosmologique est extrêmement improbable : une coïncidence sur mille ne se produisant que dans 0,1 % des volumes de Hubble.

Imaginez que vous arrivez dans un hôtel, qu'on vous attribue la chambre 1967 et que, surpris, vous remarquiez que c'est votre année de naissance. Après un instant de réflexion, vous concluez que ce n'est finalement pas si étonnant, étant donné que l'hôtel compte de nombreuses chambres et que vous n'auriez pas eu cette pensée si on vous en avait attribué une autre. Vous réalisez alors que même sans rien connaître aux hôtels, vous auriez pu déduire l'existence d'autres chambres, car s'il n'y avait qu'un seul numéro de chambre dans tout l'univers, vous seriez face à une coïncidence inexplicable.

Prenons un exemple plus pertinent : M, la masse du Soleil. Elle affecte la luminosité du Soleil, et en utilisant les principes fondamentaux de la physique, on peut calculer que la vie telle que nous la connaissons sur Terre n'est possible que si M se situe dans la fourchette étroite de $1{,}6 \times 10^{30}$ kg à $2{,}4 \times 10^{30}$ kg — sinon le climat terrestre serait plus froid que sur Mars ou plus chaud que sur Vénus. La valeur mesurée est $M \sim 2{,}0 \times 10^{30}$ kg. Cette apparente coïncidence entre l'habitable et la valeur observée de M peut paraître inquiétante, étant donné que les calculs montrent que les étoiles peuvent se situer dans une gamme de masses beaucoup plus large, $M \sim 10^{29}$ kg à 10^{32} kg. Cependant, tout comme dans l'exemple de l'hôtel, nous pouvons expliquer cette apparente coïncidence par un effet d'ensemble et de sélection : s'il existe en réalité de nombreux systèmes solaires avec des étoiles centrales et des orbites planétaires de tailles variées, alors nous nous attendons évidemment à vivre dans l'un des systèmes habitables.

Plus généralement, la coïncidence apparente entre les valeurs habitables et observées d'un paramètre physique peut être interprétée comme une preuve de l'existence d'un ensemble plus vaste, dont ce que nous observons n'est qu'un membre parmi d'autres (Carter 1973). Si l'existence d'autres « chambres d'hôtel » et de systèmes solaires est incontestable et confirmée par l'observation, celle d'univers parallèles ne l'est pas, puisqu'ils sont inobservables. Cependant, si un ajustement fin est observé, on peut argumenter en faveur de leur existence en utilisant exactement la même logique. De nombreux exemples d'ajustement fin suggèrent en effet l'existence d'univers parallèles avec d'autres constantes physiques, bien que le degré d'ajustement fin fasse encore l'objet de débats et nécessite d'être précisé par des calculs supplémentaires – voir Rees (2002) et Davies (1982) pour une vulgarisation et Barrow & Tipler (1986) pour des détails techniques.

Par exemple, si la force électromagnétique était affaiblie de seulement 4 %, le Soleil exploserait immédiatement (le diproton aurait un état lié, ce qui augmenterait la luminosité solaire d'un facteur 10). Si elle était plus forte, il y aurait moins d'atomes stables. En effet, la plupart, sinon la totalité, des paramètres qui influencent la physique des basses énergies semblent finement ajustés à un certain niveau, dans le sens où de légères modifications de ces paramètres engendrent un univers qualitativement différent.

Si l'interaction faible était sensiblement plus faible, il n'y aurait pas d'hydrogène, car il se serait transformé en hélium peu après le Big Bang. Si la masse des protons était beaucoup plus élevée ou beaucoup plus faible, les neutrinos issus d'une explosion de supernova ne parviendraient pas à évacuer les couches externes de l'étoile, et il est peu probable que les éléments lourds nécessaires à la vie puissent un jour quitter l'étoile où ils ont été produits. Si les protons étaient 0,2 % plus lourds, ils se désintégreraient en neutrons incapables de retenir des électrons, et il n'y aurait donc pas d'atomes stables. Si le rapport de masse proton/électron était beaucoup plus faible, il ne pourrait y avoir d'étoiles stables, et s'il était beaucoup plus élevé, il ne pourrait y avoir de structures ordonnées comme les cristaux et les molécules d'ADN.

Les discussions de mise au point s'enflamment souvent lorsque quelqu'un mentionne le « mot en A » : anthropique. L'auteur estime que les débats autour du principe anthropique ont suscité plus de polémiques que d'éclaircissements, avec une multitude de définitions et d'interprétations différentes. L'auteur n'a connaissance d'aucune personne contestant ce que l'on pourrait appeler le PAM (principe anthropique minimal) : **lorsqu'on teste des théories fondamentales avec des données observationnelles, ignorer les effets de sélection peut conduire à des conclusions erronées.**

Cela ressort clairement de nos exemples précédents : si l'on négligeait les effets de sélection, il serait surprenant d'orbiter autour d'une étoile aussi massive que le Soleil, car les étoiles plus légères et moins lumineuses sont bien plus nombreuses. De même, le PAM affirme que le modèle d'inflation chaotique n'est pas écarté par le fait que nous vivons dans la fraction infime de l'espace où l'inflation a pris fin, la partie en expansion étant inhabitable pour nous. Heureusement, les effets de sélection ne peuvent pas sauver tous les modèles, comme l'a souligné Boltzmann il y a un siècle. Si l'univers était en équilibre thermique classique (mort thermique), les fluctuations thermiques pourraient encore amener les atomes à s'assembler aléatoirement pour créer brièvement, de façon rarissime, un observateur conscient comme vous. Ainsi, votre existence actuelle n'invalide pas le modèle cosmologique de la mort thermique. Cependant, statistiquement, vous devriez vous attendre à trouver le reste de l'univers dans un état de forte entropie plutôt que dans l'état ordonné de faible entropie que vous observez, ce qui invalide ce modèle.

Le modèle standard de la physique des particules possède 28 paramètres libres, et la cosmologie peut en introduire d'autres, indépendants. Si nous vivons réellement dans un multivers de niveau II, alors, pour les paramètres qui varient d'un univers à l'autre, nous ne pourrons jamais prédire nos valeurs mesurées à partir des principes fondamentaux. Nous pouvons seulement calculer les distributions de probabilité de ce que nous devrions observer, en tenant compte des effets de sélection. Nous devrions nous attendre à ce que tout ce qui peut varier au sein de l'ensemble soit aussi générique que compatible avec notre existence. Comme détaillé dans la section VB, cette question de la « généricité » et, plus

précisément, du calcul des probabilités en physique, se révèle être un problème particulièrement complexe (voir section VB).

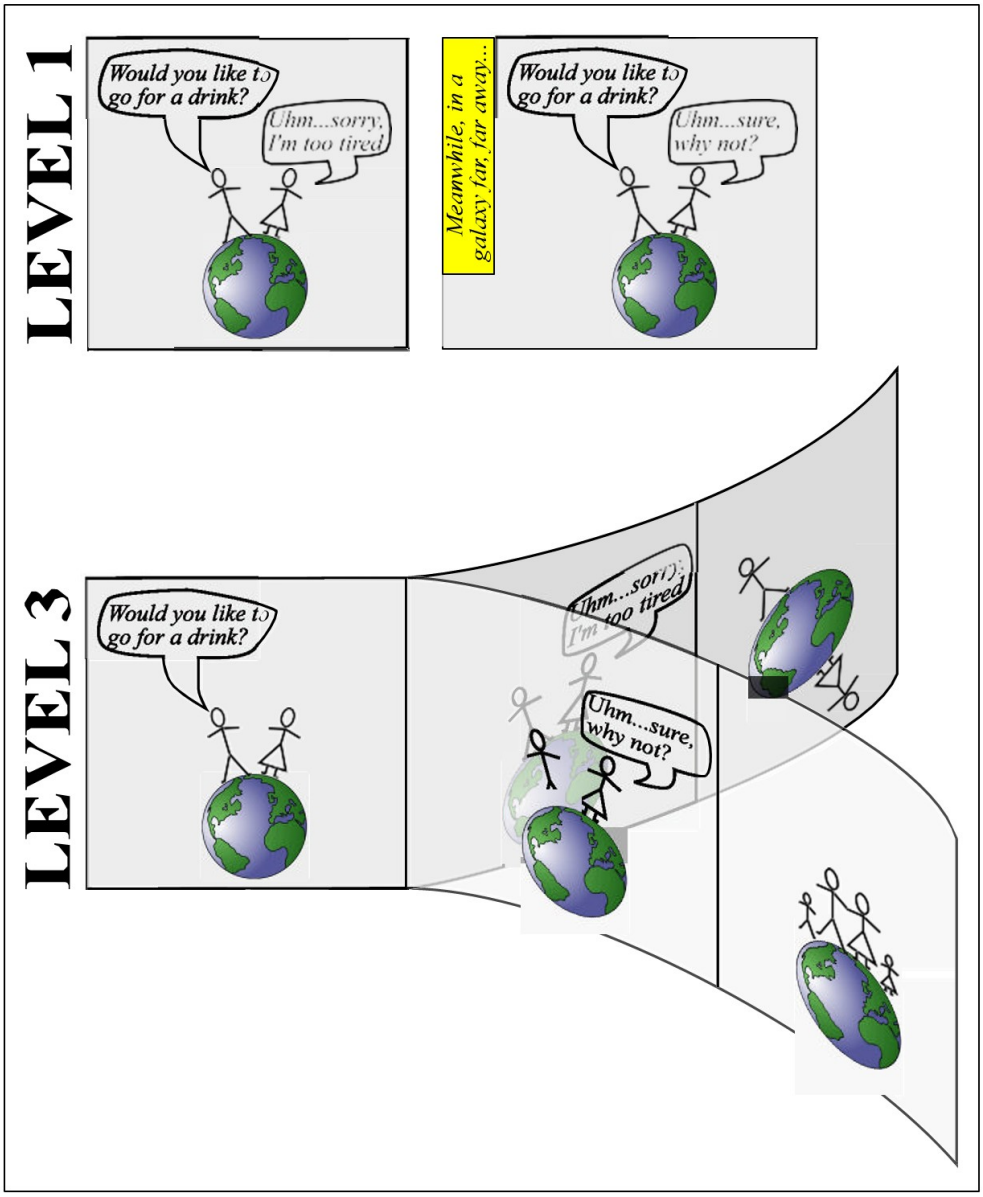


FIG. 5. Différence entre les niveaux I et III. Alors que les univers parallèles de niveau I sont très éloignés dans l'espace, ceux du niveau III sont même ici même, les événements quantiques faisant se scinder la réalité classique en lignes d'histoire parallèles qui divergent. Pourtant, le niveau III n'ajoute aucune nouvelle ligne d'histoire au-delà des niveaux I ou II.

III. NIVEAU III : LES MONDES MULTIPLES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Il pourrait exister un troisième type de mondes parallèles, qui ne sont pas lointains, mais en un certain sens juste ici. Si les équations fondamentales de la physique sont ce que les mathématiciens appellent *unitaires*, tel qu'il apparaît jusqu'à présent, l'univers se ramifie en univers parallèles, comme illustré dans le schéma (Figure 5, en bas) : lorsqu'un événement

quantique semble avoir une issue aléatoire, toutes les issues possibles se produisent en réalité, une dans chaque branche. C'est le multivers de niveau III. Bien que plus controversé que les niveaux I et II, ce niveau, comme nous le verrons, n'ajoute étonnamment aucun nouveau type d'univers.

A. Preuves de l'existence d'univers parallèles de niveau III

Au début du XXe siècle, la théorie de la mécanique quantique a révolutionné la physique en expliquant le monde atomique, avec des applications allant de la chimie aux réactions nucléaires, en passant par les lasers et les semi-conducteurs. Malgré ses succès indéniables, son interprétation a suscité un vif débat qui perdure encore aujourd'hui. En théorie quantique, l'état de l'univers n'est pas décrit en termes classiques, tels que les positions et les vitesses de toutes les particules, mais par un objet mathématique appelé fonction d'onde. Selon l'équation de Schrödinger, cet état évolue de manière déterministe au cours du temps, selon un modèle appelé unitaire. Cela correspond à une rotation dans l'espace de Hilbert, l'espace abstrait de dimension infinie où se situe la fonction d'onde. Le problème est qu'il existe des fonctions d'onde parfaitement légitimes correspondant à des situations classiquement contre-intuitives, comme celle d'être à deux endroits différents simultanément. Pire encore, l'équation de Schrödinger peut transformer des états classiques innocents en états schizophréniques. À titre d'exemple baroque, Schrödinger a décrit la célèbre expérience de pensée où un dispositif infernal tue un chat si un atome radioactif se désintègre. Puisque l'atome radioactif finit par entrer dans une superposition d'états désintégré et non désintégré, il produit un chat à la fois mort et vivant dans cette superposition.

Dans les années 1920, cette étrangeté fut expliquée par le postulat que la fonction d'onde « s'effondrait » en un résultat classique défini à chaque observation, les probabilités étant données par la fonction d'onde. Einstein était mécontent de cet aléa intrinsèque de la nature, qui violait l'unitarité, insistant sur le fait que « Dieu ne joue pas aux dés », et d'autres déploraient l'absence d'équation spécifiant le moment de cet effondrement. Dans sa thèse de doctorat de 1957, Hugh Everett III, étudiant à Princeton, démontra que ce postulat controversé d'effondrement était inutile. La théorie quantique prédisait qu'une réalité classique se scinderait progressivement en superpositions de multiples réalités (figure 5). Il montra que les observateurs percevraient subjectivement cette scission simplement comme un léger caractère aléatoire, et ce avec des probabilités en parfait accord avec celles de l'ancien postulat d'effondrement (DeWitt 2003). Cette superposition de mondes classiques constitue le multivers de niveau III.

Les travaux d'Everett laissaient deux questions cruciales sans réponse : premièrement, si le monde contient réellement des macrosuperpositions étranges, pourquoi ne les percevons-nous pas ? La réponse est apparue en 1970, lorsque Dieter Zeh a démontré que l'équation de Schrödinger elle-même engendre un type d'effet de censure (Zeh 1970). Cet effet est devenu connu sous le nom de décohérence et a été étudié en détail par Zurek, Zeh et d'autres au cours des décennies suivantes. On a découvert que les superpositions quantiques cohérentes ne persistaient que tant qu'elles restaient secrètes. Une simple collision avec un photon ou une molécule d'air indiscret suffit à garantir que nos amis de la figure 5 ne puissent jamais avoir connaissance de leurs homologues dans le scénario parallèle.

Une seconde question sans réponse concernant le modèle d'Everett était plus subtile, mais tout aussi importante : quel mécanisme physique sélectionne les états approximativement classiques (où chaque objet n'occupe qu'un seul endroit, etc.) ? Existe-t-il des états particuliers dans l'espace de Hilbert, d'une immensité vertigineuse ? La décohérence a également apporté une réponse à cette question, démontrant que les états classiques sont simplement ceux qui résistent le mieux à la décohérence.

En résumé, la décohérence permet à la fois d'identifier les univers parallèles de niveau III dans l'espace de Hilbert et de les délimiter les uns des autres. La décohérence est aujourd'hui largement acceptée et a été mesurée expérimentalement dans de nombreuses situations. Puisqu'elle imite, en pratique, l'effondrement de la fonction d'onde, elle a considérablement réduit la motivation initiale de la mécanique quantique non superposée et a contribué à populariser l'interprétation dite des mondes multiples d'Everett. Pour plus de détails sur ces questions quantiques, voir Tegmark et Wheeler (2001) pour une présentation vulgarisée et Giulini et al. (1996) pour une revue technique.

Si l'évolution temporelle de la fonction d'onde est superposée, alors le multivers de niveau III existe ; les physiciens ont donc travaillé dur pour tester cette hypothèse cruciale. À ce jour, aucune déviation de la superposition n'a été observée. Ces dernières décennies, des expériences remarquables ont confirmé la superposition de systèmes toujours plus grands, notamment l'imposant atome de carbone 60, surnommé « buckey ball », et des systèmes de fibres optiques de plusieurs kilomètres de long. Sur le plan théorique, un argument majeur contre la superposition repose sur la possible destruction d'information lors de l'évaporation des trous noirs, suggérant que les effets de la gravité quantique ne sont pas superposés et entraînent l'effondrement de la fonction d'onde. Cependant, une avancée récente en théorie des cordes, connue sous le nom de correspondance AdS/CFT, suggère que même la gravité quantique est superposée, étant mathématiquement équivalente à une théorie quantique des champs de dimension inférieure sans gravité (Maldacena 2003).

B. À quoi ressemblent les univers parallèles de niveau III ?

Lorsqu'on aborde la question des univers parallèles, il est nécessaire de distinguer deux manières différentes d'envisager une théorie physique : la vision extérieure, ou perspective de l'oiseau, d'un mathématicien étudiant ses équations mathématiques fondamentales, et la vue intérieure, ou perspective de la grenouille, d'un observateur vivant dans le monde décrit par les équations[11]. Du point de vue de l'oiseau, le multivers de niveau III est simple : il

[11] En effet, la représentation mentale standard du monde physique correspond à un troisième point de vue intermédiaire que l'on pourrait qualifier de point de vue consensuel. Du point de vue subjectif d'une grenouille, le monde se retourne lorsqu'on se met la tête en bas et disparaît lorsqu'on ferme les yeux. Pourtant, on interprète inconsciemment ses perceptions sensorielles comme s'il existait une réalité extérieure indépendante de son orientation, de sa position et de son état d'esprit. Il est frappant de constater que, malgré les formes de censure (comme le rejet des rêves), d'interpolation (entre deux clignements d'yeux) et d'extrapolation (par exemple, l'attribution de l'existence à des villes invisibles) que cette vision interne implique, il semble que des observateurs indépendants partagent ce consensus. Si la vision interne apparaît en noir et blanc à un chat, irisée à un oiseau percevant les quatre couleurs primaires, et encore plus différente pour une abeille voyant de la lumière polarisée, une chauve-souris utilisant son sonar, un aveugle doté d'un toucher et d'une ouïe plus aiguisés, ou encore le dernier aspirateur robot hors de prix, tous s'accordent sur le fait que la porte soit ouverte ou

n'existe qu'une seule fonction d'onde, qui évolue de manière continue et déterministe au fil du temps, sans aucune division ni parallélisme. Le monde quantique abstrait décrit par cette fonction d'onde évolutive contient une multitude de scénarios classiques parallèles (voir figure 5), se divisant et fusionnant continuellement, ainsi qu'un certain nombre de phénomènes quantiques qui échappent à une description classique.

Du point de vue de la grenouille, cependant, chaque observateur ne perçoit qu'une infime fraction de cette réalité : elle ne peut voir que son propre volume de Hubble (niveau I), et la décohérence l'empêche de percevoir ses copies parallèles de niveau III. Lorsqu'on lui pose une question, qu'elle prend une décision instantanée et qu'elle répond (figure 5), des effets quantiques au niveau neuronal de son cerveau engendrent de multiples résultats, et, du point de vue de l'oiseau, son passé unique se ramifie en de multiples futurs. Du point de vue de la grenouille, cependant, chaque copie d'elle ignore l'existence des autres, et elle perçoit cette ramification quantique comme un simple aléa. Par la suite, il existe, en pratique, de multiples copies d'elle-même qui possèdent exactement les mêmes souvenirs jusqu'au moment où elle répond à la question.

C. Combien existe-t-il d'univers parallèles différents ?

Aussi étrange que cela puisse paraître, la figure 5 montre que cette situation exactement identique se produit également dans le multivers de niveau I (spatial) ; la seule différence tient à l'endroit où se trouvent les copies de cette personne (la demoiselle qui répond) : ailleurs dans notre bon vieil espace tridimensionnel, plutôt qu'ailleurs dans l'espace de Hilbert de dimension infinie, dans d'autres branches quantiques. En ce sens, le niveau III (quantique) n'est pas plus étrange que le niveau I (spatial). En effet, si la physique est unitaire, alors les fluctuations quantiques durant l'inflation n'ont pas généré de conditions initiales uniques par un processus aléatoire, mais plutôt une superposition quantique de toutes les conditions initiales possibles simultanément, après quoi la décohérence a fait que ces fluctuations se comportent essentiellement de manière classique dans des branches quantiques distinctes.

La nature ergodique de ces fluctuations quantiques (section IB) implique donc que la distribution des résultats dans un volume de Hubble donné au niveau III (entre différentes branches quantiques comme dans la figure 3) est identique à la distribution obtenue en échantillonnant différents volumes de Hubble au sein d'une seule branche quantique (niveau I). Si les constantes physiques, la dimensionnalité de l'espace-temps, etc., peuvent varier comme au niveau II, elles varieront également entre les branches quantiques parallèles du niveau III. Ceci s'explique par le fait que, si la physique est unitaire, le processus de brisure spontanée de symétrie ne produira pas un résultat unique (bien qu'aléatoire), mais plutôt une superposition de tous les résultats qui se décohérent rapidement en branches de niveau III pratiquement distinctes.

---

non. Le principal défi actuel en physique consiste à dériver ce consensus semi-classique à partir des équations fondamentales qui décrivent le point de vue de l'oiseau. À mon avis, cela signifie que, même si la compréhension de la nature détaillée de la conscience humaine constitue un défi important en soi, elle n'est pas nécessaire à une théorie fondamentale de la physique.

En bref, le multivers de niveau III, s'il existe, n'apporte rien de nouveau par rapport aux niveaux I et II : seulement des copies supplémentaires et indiscernables des mêmes univers, les mêmes scénarios se répétant inlassablement dans d'autres branches quantiques. Postuler un mécanisme encore inconnu qui interromprait l'évolution continue de la fonction d'onde afin de supprimer le multivers de niveau III, en s'appuyant sur le rasoir d'Ockham, ne ferait donc pas plaisir à Ockham.

Le débat passionné autour des univers parallèles d'Everett, qui a fait rage pendant des décennies, semble donc se conclure en queue de poisson, avec la découverte d'un multivers moins controversé, mais tout aussi vaste. Ceci rappelle le célèbre débat Shapley-Curtis des années 1920, qui portait sur l'existence d'une multitude de galaxies (des univers parallèles selon les critères de l'époque) ou d'une seule. Une tempête dans un verre d'eau, maintenant que la recherche s'est orientée vers d'autres amas de galaxies, des superamas et même des volumes de Hubble. Rétrospectivement, les controverses Shapley-Curtis et Everett paraissent presque désuètes, reflétant notre réticence instinctive à élargir nos horizons.

Une objection courante est que des ramifications répétées augmenteraient exponentiellement le nombre d'univers au fil du temps. Cependant, le nombre d'univers N pourrait bien rester constant. Par le nombre d'« univers » N, nous entendons le nombre qui sont indiscernables du point de vue de la grenouille (du point de vue de l'oiseau, il n'y en a bien sûr qu'un seul) à un instant donné, c'est-à-dire le nombre de volumes de Hubble macroscopiquement différents. Bien qu'il en existe évidemment un très grand nombre (imaginez déplacer des planètes vers de nouveaux emplacements aléatoires, imaginez avoir épousé quelqu'un d'autre, etc.), le nombre N est clairement fini — même si l'on considère, par souci de pédanterie, que les volumes de Hubble au niveau quantique sont excessivement conservateurs, il n'y en a « que » environ $10^{10^{115}}$ avec une température inférieure à 10^8 K, comme indiqué ci-dessus[12].

[12] Pour le lecteur averti, la grande superposition de la fonction d'onde universelle pourrait-elle impliquer d'autres états intéressants que les états semi-classiques ? Plus précisément, les états semi-classiques (correspondant à ce que nous avons appelé la vision consensuelle) sont ceux qui présentent la plus grande robustesse face à la décohérence (Zurek 2003). Dès lors, si l'on projette la composante de la fonctionnelle d'onde définie par ces états, que reste-t-il ? On pourrait avancer, de manière simplifiée, qu'il ne reste qu'un amas de haute énergie plutôt inintéressant, dépourvu d'observateurs et sujet à une expansion ou un effondrement rapide. Considérons le cas particulier du champ électromagnétique. Dans de nombreuses circonstances (Anglin & Zurek 1996), on peut montrer que ses états semi-classiques sont des états cohérents généralisés, dont les fonctions de Wigner gaussiennes de dimension infinie ont des largeurs caractéristiques au moins égales à celles correspondant à la température locale. De telles fonctions forment une base bien conditionnée pour tous les états dont la fonction d'onde est, par conséquent, lisse, c'est-à-dire dépourvue de fluctuations violentes de haute énergie. Ceci est illustré dans la figure 6 pour le cas simple d'une particule quantique unidimensionnelle : la fonction d'onde $\psi(x)$ peut être écrite comme une superposition d'une partie à basse énergie (filtrée passe-bas) et d'une partie à haute énergie (filtrée passe-haut), et la première peut être décomposée comme la convolution d'une fonction lisse avec une gaussienne, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une superposition d'états cohérents avec des paquets d'ondes gaussiens. La décohérence isole rapidement les états semi-classiques du champ électromagnétique, macroscopiquement distincts, les uns des autres et du milieu de haute énergie. Cette composante de haute énergie pourrait être caractéristique de l'univers primordial dont nous sommes issus.

L'évolution superposée et régulière de la fonction d'onde du point de vue de l'oiseau correspond à un glissement perpétuel entre ces N instantanés de l'univers classique vus du point de vue d'une grenouille observatrice. Vous êtes actuellement dans l'univers A, celui où vous lisez cette phrase. Vous êtes maintenant dans l'univers B, celui où vous lisez cette autre phrase. Autrement dit, l'observateur de l'univers B est identique à celui de l'univers A, à l'exception d'un instant de mémoire supplémentaire. Sur la figure 5, notre observatrice se trouve d'abord dans l'univers décrit par le panneau de gauche, mais deux univers différents s'y connectent progressivement, comme B se connectait à A. Dans les deux cas, elle ignore l'existence de l'autre.

Imaginez dessiner un point distinct pour chaque univers possible et des flèches indiquant les connexions dans la perspective de la grenouille. Un point peut mener à un seul autre point ou à plusieurs, comme ci-dessus. De même, plusieurs points peuvent mener à un seul et même point, puisqu'il peut exister de nombreuses possibilités.

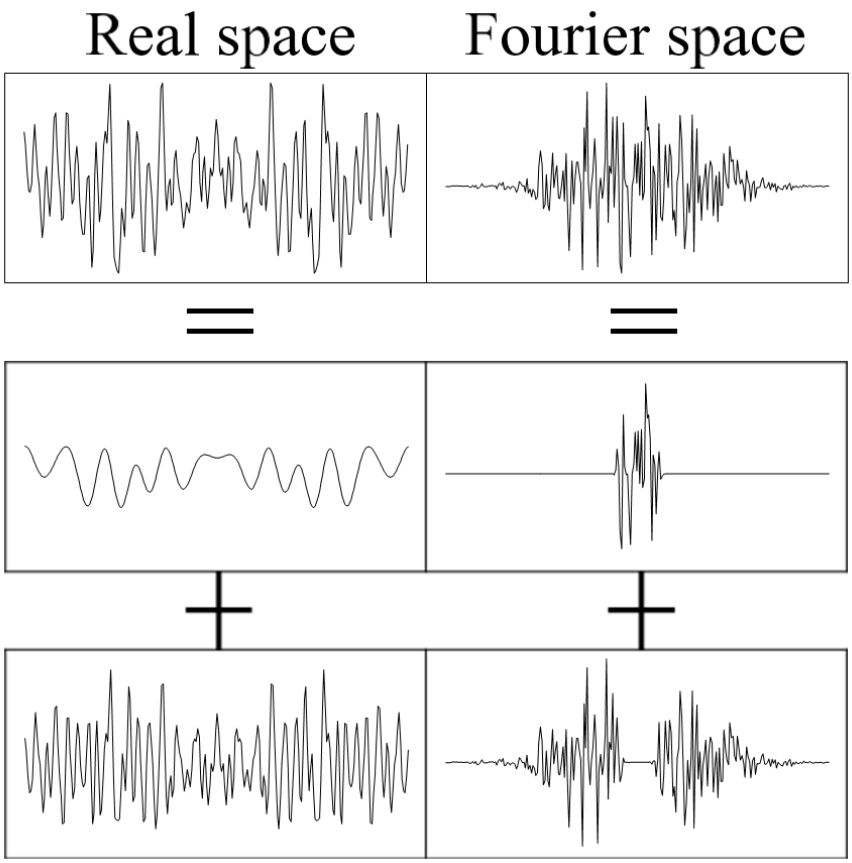


FIG. 6. Illustration schématique (voir note) de la manière dont une fonction d'onde du multivers de niveau III (ligne du haut pour un espace de Hilbert unidimensionnel simple) peut être décomposée en une superposition de mondes semi-classiques (états cohérents généralisés ; ligne du milieu) et d'un désordre de haute énergie (ligne du bas).

Il existe différentes manières dont certaines situations auraient pu se produire. Le multivers de niveau III implique donc non seulement la division des branches, mais aussi leur fusion.

L'ergodicité implique que l'état quantique du multivers de niveau III est invariant par translation spatiale, une opération unitaire au même titre que la translation temporelle. S'il est également invariant par translation temporelle (ce qui peut être obtenu en construisant une superposition d'un ensemble infini d'états quantiques, tous étant des translations temporelles différentes d'un même état, de sorte qu'un Big Bang se produise à des moments différents dans différentes branches quantiques), alors le nombre d'univers resterait automatiquement et parfaitement constant. Tous les instantanés possibles de l'univers existeraient à chaque instant, et le passage du temps ne serait qu'une question de perception — une idée explorée dans le roman de science-fiction « Permutation City » (Egan, 1995) et développée par Deutsch (1997), Barbour (2001) et d'autres.

D. Deux visions du monde

Le débat sur la façon dont la mécanique classique émerge de la mécanique quantique se poursuit, et la découverte de la décohérence a montré que le phénomène est bien plus complexe que la simple réduction de la constante de Planck ħ à zéro. Pourtant, comme l'illustre la figure 7, il ne s'agit que d'une petite pièce d'un puzzle bien plus vaste. En effet, le débat sans fin sur l'interprétation de la mécanique quantique — et même la question plus générale des univers parallèles — n'est en quelque sorte que la partie émergée d'un iceberg.

Dans la parodie de science-fiction « Le Guide du voyageur galactique », la réponse est « 42 », et le plus difficile est de trouver la véritable question. Les interrogations sur les univers parallèles semblent atteindre le summum des questionnements sur la réalité. Pourtant, une question sous-jacente encore plus profonde se pose : il existe deux paradigmes plausibles mais diamétralement opposés concernant la réalité physique et le statut des mathématiques, une dichotomie qui remonte sans doute à Platon et Aristote. La question est de savoir lequel est le bon.

- PARADIGME ARISTOTÉLICIEN : Le point de vue subjectif de la grenouille est physiquement réel, tandis que le point de vue de l'oiseau et tout son langage mathématique ne sont qu'une approximation utile.

- PARADIGME PLATONICIEN : Le point de vue de l'oiseau (la structure mathématique) est physiquement réel, tandis que le point de vue de la grenouille et tout le langage humain que nous utilisons pour le décrire ne sont qu'une approximation utile pour décrire nos perceptions subjectives.

Qu'est-ce qui est le plus fondamental : le point de vue de la grenouille ou celui de l'oiseau ? Qu'est-ce qui est le plus fondamental : le langage humain ou le langage mathématique ? Votre réponse déterminera votre perception des univers parallèles. Si vous préférez le paradigme platonicien, les multivers devraient vous paraître naturels, car notre sentiment que le multivers de niveau III est « bizarre » reflète simplement l'extrême différence entre les points de vue de la grenouille et de l'oiseau. Nous rompons la symétrie en qualifiant ce dernier d'étrange car nous avons tous été imprégnés du paradigme aristotélicien dès notre plus jeune âge, bien avant même d'avoir entendu parler de mathématiques ; la vision platonicienne est une question de goût.

Dans le second cas (platonicien), toute la physique est en fin de compte un problème mathématique, puisqu'un mathématicien infiniment intelligent, connaissant les équations fondamentales du cosmos, pourrait en principe calculer le point de vue de la grenouille, c'est-à-dire calculer quels observateurs conscients de soi l'univers contiendrait, ce qu'ils percevraient et le langage qu'ils inventeraient pour se décrire mutuellement leurs perceptions. Autrement dit, il existe une « Théorie du Tout » (TdT) au sommet de l'arbre de la figure 7, dont les axiomes sont purement mathématiques, puisque les postulats en anglais concernant l'interprétation seraient dérivables et donc superflus. Dans le paradigme aristotélicien, en revanche, il ne peut y avoir de TdT, car on se contente finalement d'expliquer certains énoncés verbaux par d'autres énoncés verbaux — c'est ce qu'on appelle le problème de la régression à l'infini (Nozick, 1981).

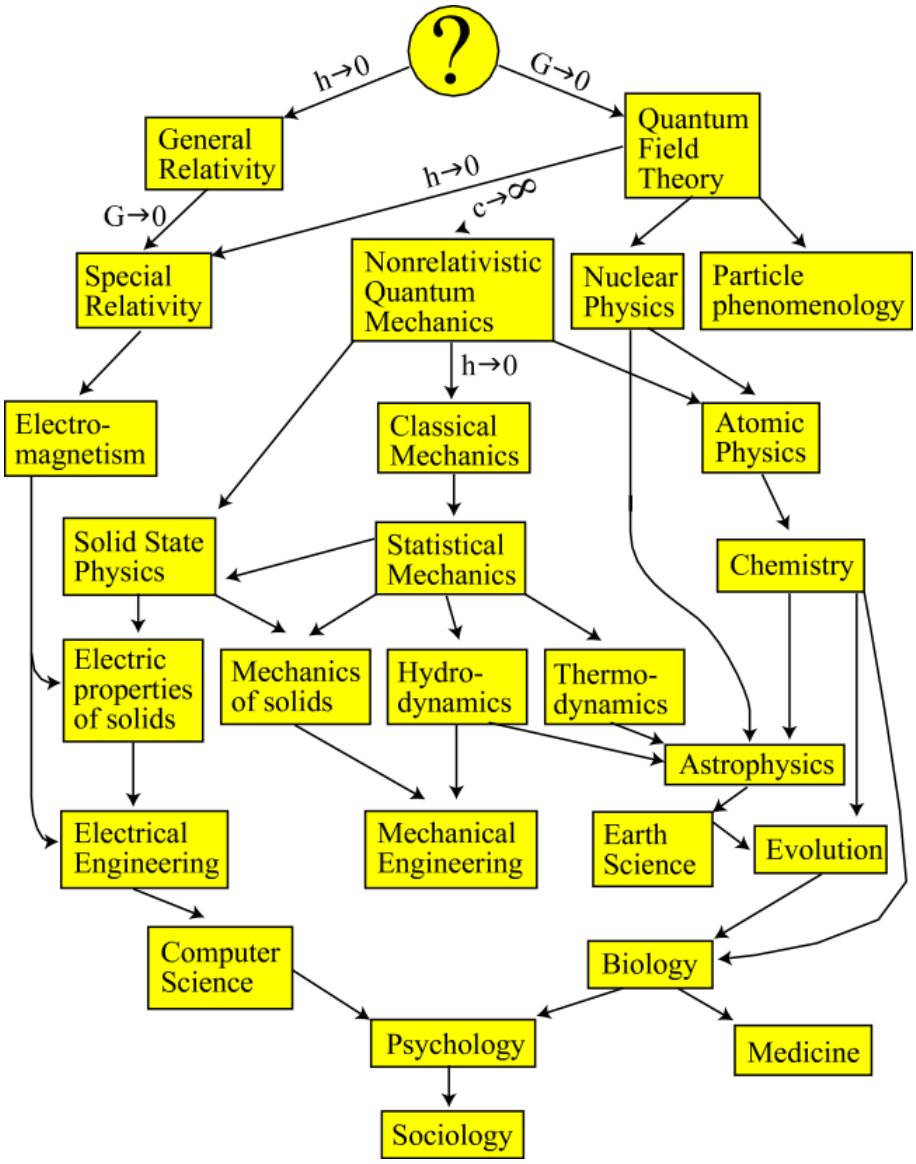


FIG. 7. Les théories peuvent être grossièrement organisées en un arbre généalogique où chacune pourrait, au moins en principe, être dérivée de théories plus fondamentales situées au-dessus d'elle. Par exemple, la mécanique classique peut être obtenue à partir de la relativité restreinte dans l'approximation où la vitesse de la lumière *c* est infinie. La plupart des flèches sont moins bien comprises. Toutes ces théories comportent deux

composantes : des équations mathématiques et des mots qui expliquent comment elles se rattachent à ce que nous observons. À chaque niveau de la hiérarchie des théories, de nouveaux mots (par exemple, protons, atomes, cellules, organismes, cultures) sont introduits parce qu'ils sont commodes, capturant l'essence de ce qui se passe sans recourir à la théorie plus fondamentale située au-dessus. Il est toutefois important de se rappeler que ce sont nous, humains, qui introduisons ces concepts et les mots pour les désigner : en principe, tout pourrait être dérivé de la théorie fondamentale au sommet de l'arbre, bien qu'une approche réductionniste aussi extrême soit évidemment inutile en pratique. En gros, le rapport entre équations et mots diminue à mesure que l'on descend dans l'arbre, devenant proche de zéro pour des domaines très appliqués comme la médecine et la sociologie. En revanche, les théories proches du sommet sont hautement mathématiques, et les physiciens peinent encore à comprendre les concepts, s'il en existe, permettant de les interpréter. Le Graal de la physique consiste à trouver ce que l'on appelle plaisamment une « théorie du tout » (TdT), à partir de laquelle tout le reste pourrait être dérivé. Si une telle théorie existe, elle devrait remplacer le grand point d'interrogation au sommet de l'arbre des théories. Tout le monde sait qu'il manque encore quelque chose, puisque nous ne disposons pas d'une théorie cohérente unifiant la gravité et la mécanique quantique.

IV. NIVEAU IV : AUTRES STRUCTURES MATHÉMATIQUES

Supposons que vous adhériez au paradigme platonicien et que vous croyiez qu'il existe réellement une TdT au sommet de la figure 7 — et dont nous n'avons tout simplement pas encore trouvé les équations correctes. Une question embarrassante demeure alors, comme le souligne John Archibald Wheeler : pourquoi ces équations en particulier, et pas d'autres ? Explorons maintenant l'idée de démocratie mathématique, selon laquelle des univers régis par d'autres équations sont également réels. C'est le multivers de niveau IV. Il nous faut cependant d'abord assimiler deux autres idées : le concept de structure mathématique et l'idée que le monde physique puisse en être une.

A. Qu'est-ce qu'une structure mathématique ?

Beaucoup d'entre nous perçoivent les mathématiques comme un ensemble de tours de passe-passe appris à l'école pour manipuler les nombres. Pourtant, la plupart des mathématiciens ont une vision bien différente de leur discipline. Ils étudient des objets plus abstraits tels que les fonctions, les ensembles, les espaces et les opérateurs, et s'efforcent de démontrer des théorèmes sur les relations qui les unissent. En effet, certains articles de mathématiques modernes sont si abstraits que les seuls nombres qu'on y trouve sont les numéros de page ! Quel est le point commun entre un dodécaèdre et un ensemble de nombres complexes ? Malgré la pléthore de structures mathématiques aux noms intimidants comme les orbifolds et les champs de Killing, une remarquable unité sous-jacente a émergé au cours du siècle dernier : toutes les structures mathématiques ne sont que des cas particuliers d'une même chose, les systèmes formels. Un système formel est constitué de symboles abstraits et de règles permettant de les manipuler, spécifiant comment de nouvelles suites de symboles, appelées théorèmes, peuvent être dérivées de suites données, appelées axiomes. Ce développement historique a représenté une forme de déconstructionnisme, puisqu'il a dépouillé les structures mathématiques de toute signification et interprétation traditionnelles, pour n'en retenir que les relations abstraites qui en saisissent l'essence même. De ce fait, les ordinateurs peuvent désormais démontrer

des théorèmes de géométrie sans avoir la moindre intuition physique de la nature de l'espace.

La figure 8 présente certaines des structures mathématiques les plus fondamentales et leurs interrelations. Bien que cet arbre généalogique s'étende probablement à l'infini, il illustre la nature concrète des structures mathématiques. Elles sont « là-bas », en ce sens que les mathématiciens les découvrent plutôt que de les créer, et que des civilisations extraterrestres contemplatives pourraient trouver les mêmes structures (un théorème est vrai, qu'il soit démontré par un humain, un ordinateur ou un extraterrestre).

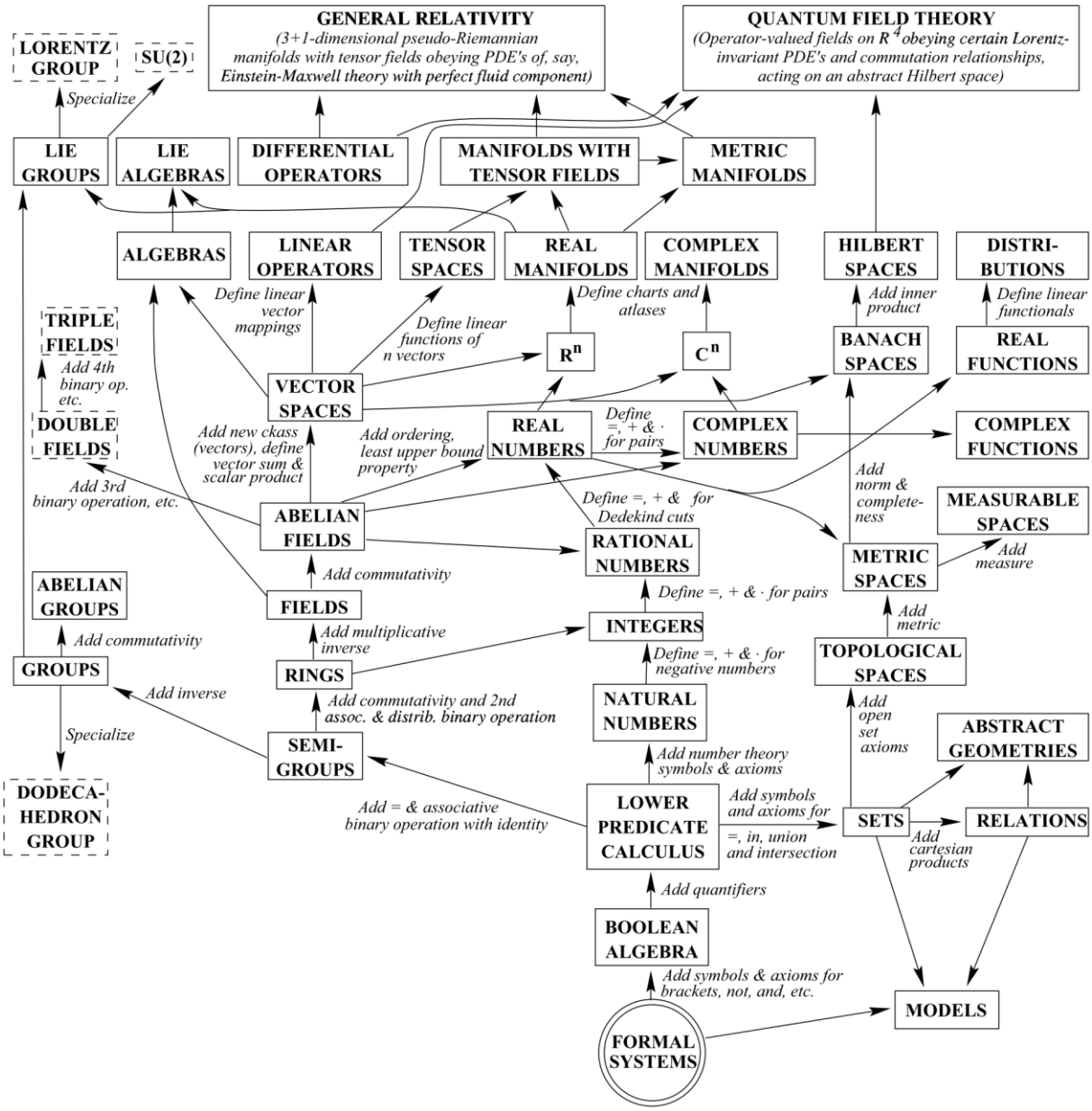


FIG. 8. Relations entre diverses structures mathématiques fondamentales (Tegmark, 1998). Les flèches indiquent généralement l'ajout de nouveaux symboles et/ou axiomes. Les flèches qui se rejoignent indiquent la combinaison de structures — par exemple, une

algèbre est un espace vectoriel qui est aussi un anneau, et un groupe de Lie est un groupe qui est aussi une variété. L'arbre complet est probablement d'étendue infinie — la figure n'en montre qu'un petit échantillon près de la base.

B. La possibilité que le monde physique soit une structure mathématique

Examinons maintenant l'idée que le monde physique (plus précisément, le multivers de niveau III) est une structure mathématique. Bien que traditionnellement considérée comme allant de soi par beaucoup de physiciens théoriciens, il s'agit d'une notion profonde et d'une grande portée. Cela signifie que les équations mathématiques ne décrivent pas seulement certains aspects limités du monde physique, mais tous les aspects de celui-ci. Cela signifie qu'il existe une structure mathématique que les mathématiciens appellent isomorphe (et donc équivalente) à notre monde physique, chaque entité physique ayant un correspondant unique dans la structure mathématique et vice versa. Prenons quelques exemples.

Il y a un siècle, à l'époque où la physique classique régnait encore en maître, de nombreux scientifiques pensaient que l'espace physique était isomorphe à la structure mathématique connue sous le nom de R^3 : l'espace euclidien tridimensionnel. De plus, certains pensaient que toutes les formes de matière dans l'univers correspondaient à diverses formes classiques de champs : le champ électrique, le champ magnétique et peut-être quelques autres encore inconnus, correspondant mathématiquement à des fonctions sur R^3 (une poignée de nombres à chaque point de l'espace). Selon cette conception (qui s'est avérée erronée par la suite), les amas denses de matière, comme les atomes, étaient simplement des régions de l'espace où certains champs étaient intenses (où certains nombres étaient grands). Ces champs évoluaient de manière déterministe au fil du temps selon des équations aux dérivées partielles, et les observateurs percevaient cela comme des objets en mouvement et des événements qui se produisaient. Les champs dans l'espace tridimensionnel pourraient-ils alors être la structure mathématique correspondant à l'univers ? Non, puisqu'une structure mathématique ne peut pas changer. Il s'agit d'une entité abstraite et immuable, existant hors de l'espace et du temps. Notre perspective familière de grenouille, qui conçoit un espace tridimensionnel où se déroulent les événements, équivaut, du point de vue de l'oiseau, à un espace-temps quadridimensionnel contenant toute l'histoire. La structure mathématique serait donc constituée de champs dans un espace à quatre dimensions. Autrement dit, si l'histoire était un film, sa structure mathématique ne correspondrait pas à une image unique, mais à la totalité de la vidéo.

Étant donné une structure mathématique, nous dirons qu'elle possède une existence physique si une sous-structure auto-consciente (SAC) quelconque, au sein de ce système, se perçoit subjectivement, de son point de vue de grenouille, comme vivant dans un monde physiquement réel. À quoi ressemblerait mathématiquement une telle SAC ? Dans l'exemple de physique classique mentionné précédemment, une SAC comme vous serait un tube traversant l'espace-temps, une version épaisse de ce qu'Einstein appelait une ligne d'univers. La position du tube déterminerait votre position dans l'espace à différents instants. À l'intérieur du tube, les champs présenteraient un comportement complexe, correspondant au stockage et au traitement d'informations sur les valeurs des champs environnants. À chaque point du tube, ces processus engendreraient la sensation familière, mais

mystérieuse, de conscience de soi. De son point de vue de grenouille, la SAC percevrait cette suite unidimensionnelle de perceptions le long du tube comme le passage du temps.

Bien que notre exemple illustre l'idée de la façon dont notre monde physique peut être décrit, on sait aujourd'hui que la structure mathématique proposée (des champs dans un espace à quatre dimensions) est erronée. Après avoir compris que l'espace-temps pouvait être courbé, Einstein a obstinément recherché une théorie dite du champ unifié, où l'univers était ce que les mathématiciens appellent une variété pseudo-riemannienne à 3+1 dimensions avec des champs tensoriels. Cependant, cette théorie n'a pas permis d'expliquer le comportement observé des atomes. Selon la théorie quantique des champs, synthèse moderne de la relativité restreinte et de la théorie quantique, l'univers (ici, le multivers de niveau III) est une structure mathématique appelée algèbre de champs à valeurs opérateurs. La question de la définition d'une algèbre de champ à valeurs opérateurs est ici plus complexe (Tegmark 2000). Or, cette théorie ne parvient pas à décrire l'évaporation des trous noirs, la première manifestation du Big Bang et d'autres phénomènes de gravité quantique. Ainsi, la véritable structure mathématique isomorphe à notre univers, si elle existe, reste à découvrir.

C. Démocratie mathématique

Supposons maintenant que notre monde physique soit en réalité une structure mathématique, et que vous soyez une SAC au sein de celle-ci. Cela signifie que, dans l'arbre mathématique de la figure 8, l'une des cases représente notre univers. (L'arbre complet est probablement d'étendue infinie ; notre case particulière ne figure donc pas parmi les quelques cases de la base de l'arbre qui sont représentées.)

Autrement dit, cette structure mathématique particulière jouit non seulement d'une existence mathématique, mais aussi d'une existence physique. Qu'en est-il des autres éléments de l'arbre ? Jouissent-ils également d'une existence physique ? Dans le cas contraire, il existerait une asymétrie ontologique fondamentale et inexpliquée, inhérente à la réalité même, divisant les structures mathématiques en deux catégories : celles qui possèdent une existence physique et celles qui n'en possèdent pas. Pour sortir de cette énigme philosophique, j'ai proposé (Tegmark 1998) que la démocratie mathématique soit totale : **l'existence mathématique et l'existence physique sont équivalentes, de sorte que toutes les structures mathématiques existent aussi physiquement. C'est le multivers de niveau IV**. On peut le considérer comme une forme de platonisme radical, affirmant que les structures mathématiques de Platon existent bel et bien physiquement dans le domaine des idées, le paysage mental. Selon Rucker (1982), ces entités existent « là-bas » au sens physique (Davies 1993), ce qui traduit la théorie du réalisme modal de David Lewis (1986) en termes mathématiques proches de ce que Barrow (1991 ; 1992) appelle « π dans le ciel ». Si cette théorie est correcte, alors, puisqu'elle ne comporte aucun paramètre libre, toutes les propriétés de tous les univers parallèles (y compris les perceptions subjectives des SAC qui s'y trouvent) pourraient en principe être déduites par un mathématicien infiniment intelligent.

D. Preuves de l'existence d'un multivers de niveau IV

Nous avons décrit les quatre niveaux d'univers parallèles par ordre de spéculation croissante. Alors, pourquoi croire au niveau IV ? Logiquement, il repose sur deux hypothèses distinctes :

- Hypothèse 1 : Que le monde physique (plus précisément notre multivers de niveau III) est une structure mathématique.

- Hypothèse 2 : Démocratie mathématique : l'idée que toutes les structures mathématiques existent « là-bas » au même sens.

Dans un essai célèbre, Wigner (1967) affirmait que « l'immense utilité des mathématiques dans les sciences naturelles frôle le mystère » et qu'« il n'existe aucune explication rationnelle à cela ». Cet argument peut étayer l'hypothèse 1 : l'utilité des mathématiques pour décrire le monde physique découle naturellement du fait qu'il est une structure mathématique que nous découvrons progressivement. Les diverses approximations qui constituent nos théories physiques actuelles sont efficaces car des structures mathématiques simples peuvent fournir de bonnes approximations de la façon dont un système d'analyse de la dynamique des systèmes (SAC) percevra des structures mathématiques plus complexes. Autrement dit, nos théories efficaces ne sont pas des mathématiques approchant la physique, mais des mathématiques approchant les mathématiques. L'observation de Wigner a peu de chances de reposer sur de simples coïncidences fortuites, puisque bien davantage de régularité mathématique dans la nature a été découverte dans les décennies qui ont suivi, notamment le modèle standard de la physique des particules.

Un deuxième argument en faveur de l'hypothèse 1 est que les mathématiques abstraites sont si générales que tout ensemble d'entités définissable en termes purement formels (indépendamment de toute terminologie humaine imprécise) est également une structure mathématique. Par exemple, une TdT impliquant un ensemble de types d'entités différents (désignés par des mots, par exemple) et les relations entre elles (désignées par d'autres mots) n'est autre que ce que les mathématiciens appellent un modèle ensembliste, et l'on peut généralement trouver un système formel dont il est un modèle.

Cet argument rend également l'hypothèse 2 plus attrayante, puisqu'elle implique que toute théorie des univers parallèles concevable peut être décrite au niveau IV. Le multivers de niveau IV, qualifié de « théorie de l'ensemble ultime » par Tegmark (1997) car il englobe tous les autres ensembles, clôt ainsi la hiérarchie des multivers, et il ne peut y avoir de niveau V. Considérer un ensemble de structures mathématiques n'apporte rien de nouveau, puisqu'il s'agit toujours d'une autre structure mathématique.

Qu'en est-il de l'idée fréquemment évoquée selon laquelle l'univers est une simulation informatique ? Cette idée est courante en science-fiction et a été largement développée, par exemple (Schmidthuber 1997 ; Wolfram 2002). Le contenu informationnel (état de la mémoire) d'un ordinateur numérique est une chaîne de bits, par exemple « 1001011100111001… », de grande longueur mais finie, équivalente à un entier grand mais fini n écrit en binaire. Le traitement de l'information par un ordinateur est une règle

déterministe qui transforme chaque état de mémoire en un autre (appliquée de manière répétée) ; mathématiquement, il s'agit donc simplement d'une fonction f appliquant les entiers sur eux-mêmes de manière itérative : $n \rightarrow f(n) \rightarrow f(f(n)) \rightarrow \ldots$

Autrement dit, même la simulation informatique la plus sophistiquée n'est qu'un cas particulier d'une structure mathématique et fait déjà partie du multivers de niveau IV. (Par ailleurs, **l'itération de fonctions continues plutôt que de fonctions à valeurs entières peut donner lieu à des fractales**.)

Un autre aspect intéressant de l'hypothèse 2 est qu'elle fournit jusqu'à présent la seule réponse à la question de Wheeler : pourquoi ces équations en particulier, et pas d'autres ? Le fait que les univers dansent au rythme de toutes les équations possibles résout définitivement le problème du réglage fin de la section IIC, même au niveau des équations fondamentales : bien que de nombreuses structures mathématiques, sinon la plupart, soient probablement inertes et dépourvues de SAC, car incapables de fournir la complexité, la stabilité et la prévisibilité requises par les SAC, nous nous attendons bien sûr à trouver, avec une probabilité de 100 %, une structure mathématique capable d'abriter la vie. En raison de cet effet de sélection, la réponse à la question « qu'est-ce qui insuffle la vie aux équations et crée un univers qu'elles peuvent décrire ? » (Hawking 1993) serait alors : « vous, la SAC ».

E. À quoi ressemblent les univers parallèles de niveau IV ?

Pour utiliser, tester et potentiellement réfuter une théorie, on calcule les distributions de probabilité de nos perceptions futures en fonction de nos perceptions passées, puis on compare ces prédictions aux résultats observés. Dans une théorie du multivers, il existe généralement plusieurs SAC ayant vécu une vie antérieure identique à la vôtre ; il est donc impossible de déterminer lequel est vous. Pour faire des prédictions, il faut donc calculer la proportion de ces SAC qui percevront quoi à l'avenir, ce qui conduit aux prédictions suivantes :

- Prédiction 1 : La structure mathématique qui décrit notre monde est la plus générique qui soit cohérente avec nos observations.

- Prédiction 2 : Nos observations futures seront les plus génériques qui soient cohérentes avec nos observations passées.

- Prédiction 3 : Nos observations passées sont les plus génériques qui soient compatibles avec notre existence.

Nous reviendrons sur le problème de ce que signifie « générique » dans la section B (Le problème de la mesure). Cependant, une caractéristique frappante des structures mathématiques, discutée en détail dans Tegmark (1997), est que les propriétés de symétrie et d'invariance responsables de la simplicité et de l'ordre de notre univers tendent à être génériques. Elles sont plus la règle que l'exception — les structures mathématiques les possèdent généralement par défaut, et il faut ajouter des axiomes supplémentaires complexes, etc., pour les faire disparaître. Autrement dit, en raison de cela et des effets de sélection, il ne faut pas nécessairement s'attendre à ce que la vie dans le multivers de niveau IV soit un chaos total.

V. DISCUSSION

Nous avons passé en revue les théories scientifiques des univers parallèles et constaté qu'elles forment naturellement une hiérarchie à quatre niveaux de multivers (figure 1) permettant des différences progressivement plus grandes par rapport à notre propre univers :

- Niveau I : Les autres volumes de Hubble ont des conditions initiales différentes.

- Niveau II : D'autres bulles post-inflationnaires peuvent avoir des lois physiques effectives différentes (constantes, dimensionnalité, contenu en particules).

- Niveau III : Les autres branches de la fonction d'onde quantique n'apportent rien de qualitativement nouveau.

- Niveau IV : D'autres structures mathématiques possèdent des équations fondamentales de la physique différentes.

Alors que les univers de niveau I s'enchaînent sans discontinuité, des démarcations nettes existent entre ceux des niveaux II et III, dues respectivement à l'expansion de l'espace et à la décohérence. Les univers de niveau IV sont totalement indépendants et ne doivent être considérés ensemble que pour prédire votre avenir, puisque vous pouvez exister dans plusieurs d'entre eux.

Bien que ce soit le niveau I qui ait valu à Giordano Bruno des démêlés avec l'Inquisition, rares sont les astronomes qui, aujourd'hui, affirment que l'espace s'arrête brutalement aux limites de l'univers observable. Ironie du sort, et peut-être simple coïncidence historique, c'est le niveau III qui a suscité le plus de controverses ces dernières décennies, car il est le seul à ne pas introduire de nouveaux types d'univers.

A. Perspectives d'avenir

De nombreuses perspectives d'avenir s'offrent à nous pour tester, voire réfuter, ces théories du multivers. Au cours de la prochaine décennie, l'amélioration spectaculaire des mesures cosmologiques du rayonnement de fond diffus cosmologique et de la distribution de la matière à grande échelle, etc., permettra de tester le niveau I en contraignant davantage la courbure et la topologie de l'espace, et le niveau II en soumettant l'inflation à des tests rigoureux. Les progrès en astrophysique et en physique des hautes énergies devraient également clarifier la précision du réglage des différentes constantes physiques, renforçant ou affaiblissant ainsi l'hypothèse du niveau II. Si l'effort mondial actuel pour construire des ordinateurs quantiques aboutit, il apportera des preuves supplémentaires en faveur du niveau III, puisqu'ils exploiteraient, par essence, le parallélisme du multivers de niveau III pour le calcul parallèle (Deutsch 1997). À l'inverse, la mise en évidence expérimentale d'une violation de l'unitarité invaliderait le niveau III. Enfin, le succès ou l'échec du grand défi de la physique moderne, l'unification de la relativité générale et de la théorie quantique des champs, éclairera davantage le niveau IV. Soit nous finirons par trouver une structure mathématique correspondant à notre univers, soit nous atteindrons les limites de l'efficacité déraisonnable des mathématiques et devrons abandonner le niveau IV.

B. Le problème de la mesure

Il existe également des questions théoriques intéressantes à résoudre au sein des théories du multivers, au premier rang desquelles le problème de mesure. À mesure que les théories du multivers gagnent en crédibilité, la question épineuse du calcul des probabilités en physique, autrefois simple désagrément, devient un véritable casse-tête. L'importance des probabilités tient au fait que, s'il existe effectivement de nombreuses copies de « vous » avec des vies passées et des souvenirs identiques, vous seriez incapable de prédire votre propre avenir, même en connaissant parfaitement l'état du multivers. En effet, il vous serait impossible de déterminer laquelle de ces copies est « vous » (chacune se perçoit comme telle). Tout ce que vous pouvez prédire, ce sont les probabilités.

Il s'agit donc des probabilités de ce que vous observerez, correspondant aux proportions d'observateurs qui perçoivent différentes choses. Malheureusement, calculer la proportion d'observateurs parmi une infinité d'autres qui perçoivent quoi est très complexe, car la réponse dépend de l'ordre dans lequel on les compte ! La proportion d'entiers pairs est de 50 % si on les ordonne de 1 à 4…, mais elle tend vers 100 % si on les ordonne par ordre alphabétique, comme le ferait un traitement de texte (1, 10, 100, 1000…). Lorsque les observateurs résident dans des univers déconnectés, il n'existe pas de méthode naturelle évidente pour les ordonner, et il faut procéder à un échantillonnage des différents univers avec des pondérations statistiques, appelées « mesure » par les mathématiciens.

Ce problème apparaît de manière mineure et traitable au niveau I, devient critique au niveau II, a suscité de nombreux débats dans le cadre de l'extraction des probabilités quantiques au niveau III (DeWitt, 2003), et est catastrophique au niveau IV. Au niveau II, par exemple, Vilenkin et d'autres ont publié des prédictions concernant les distributions de probabilité de divers paramètres cosmologiques en arguant que différents univers parallèles ayant subi une inflation différente devraient se voir attribuer des pondérations statistiques proportionnelles à leur volume (par exemple, Garriga et Vilenkin 2001a).

Par ailleurs, tout mathématicien vous dira que $2 \times \infty = \infty$; il n'existe donc aucun sens objectif selon lequel un univers infini qui s'est dilaté d'un facteur deux est devenu plus grand. En effet, un univers en expansion exponentielle possède ce que les mathématiciens appellent un vecteur de Killing de type temps, ce qui signifie qu'il est invariant par translation temporelle et donc immuable d'un point de vue mathématique. De plus, un univers plat de volume fini et de topologie torique est équivalent à un univers parfaitement périodique de volume infini, tant du point de vue mathématique global que du point de vue d'un observateur situé à l'intérieur de cet univers. Dès lors, pourquoi son volume infiniment plus petit lui conférerait-il un poids statistique nul ? Puisque les volumes de Hubble commencent à se répéter même dans le multivers de niveau I (bien que dans un ordre aléatoire et non périodique) après environ $10^{10^{115}}$ mètres, un espace infini doit-il réellement se voir attribuer un poids statistique supérieur à celui d'une région finie de cette taille ? Dans un espace de taille infinie, l'espace doit-il réellement avoir un poids statistique supérieur à celui d'une région finie de même dimension ? Il est impératif de résoudre ce problème pour tester par l'observation les modèles d'inflation stochastique. Si cela vous paraît complexe, considérez le problème de l'attribution de poids statistiques à différentes structures mathématiques de niveau IV.

La relative simplicité apparente de notre univers a conduit nombre de chercheurs à suggérer que la mesure appropriée implique d'une manière ou d'une autre la complexité. Par exemple, on pourrait privilégier la simplicité en pondérant chaque structure mathématique par 2^{-n}, où n est son contenu informationnel algorithmique mesuré en bits, défini comme la longueur de la plus courte chaîne binaire (un programme informatique, par exemple) qui le spécifie (Chaitin 1987). Cela correspondrait à des poids égaux pour toutes les chaînes binaires infinies (chacune représentable par un nombre réel comme 0,101011101…), et non pour toutes les structures mathématiques. S'il existe une telle pénalité exponentielle pour les structures de grande complexité, nous devrions probablement nous attendre à nous trouver dans l'une des structures mathématiques les plus simples suffisamment complexes pour contenir des observateurs. Cependant, la complexité algorithmique dépend de la manière dont les structures sont représentées par des chaînes de bits (Chaitin 1987 ; Deutsch 2003), et il est loin d'être évident qu'il existe une définition la plus naturelle à laquelle la réalité puisse se conformer.

C. Les avantages et les inconvénients des univers parallèles

Faut-il donc croire aux univers parallèles ? Concluons par une brève discussion des arguments pour et contre. Tout d'abord, nous avons vu qu'il ne s'agit pas d'une question binaire (oui/non) ; la question la plus intéressante est plutôt de savoir s'il existe 0, 1, 2, 3 ou 4 niveaux de multivers. La figure 1 résume les preuves en faveur des différents niveaux. Les observations cosmologiques soutiennent le niveau I en indiquant un espace infini plat avec une distribution de matière ergodique, et le niveau I, combiné à l'inflation, élimine élégamment le problème des conditions initialeseler. Le niveau II est soutenu par le succès de la théorie de l'inflation pour expliquer les observations cosmologiques, et il peut expliquer le réglage fin apparent des paramètres physiques. Le niveau III est soutenu par des preuves expérimentales et théoriques de l'unitarité, et explique le caractère aléatoire quantique apparent qui a tant perturbé Einstein sans abandonner la causalité du point de vue global. Le niveau IV explique l'efficacité surprenante des mathématiques pour décrire la physique selon Wigner et répond à la question : « Pourquoi ces équations, et pas d'autres ? »

Les principaux arguments contre les univers parallèles sont leur caractère superflu et leur étrangeté. Examinons donc ces deux objections tour à tour. Le premier argument est que les théories du multivers sont vulnérables au rasoir d'Ockham, puisqu'elles postulent l'existence d'autres mondes que nous ne pourrons jamais observer. Pourquoi la nature serait-elle ontologiquement si prodigue et se livrerait-elle à une telle opulence qu'elle contiendrait une infinité de mondes différents ? Curieusement, cet argument peut être retourné en faveur d'un multivers. Lorsque nous avons le sentiment que la nature gaspille, qu'est-ce qui nous dérange précisément dans ce gaspillage ? Certainement pas « l'espace », puisque le modèle standard de l'univers plat, avec son volume infini, ne soulève pas de telles objections. Certainement pas non plus la « masse » ou les « atomes », pour la même raison : une fois qu'on a gaspillé une quantité infinie de quelque chose, qui s'en soucie si on en gaspille encore ? C'est plutôt la réduction apparente de la simplicité qui semble perturbante, la quantité d'informations nécessaires pour spécifier tous ces mondes invisibles. Cependant, comme l'explique plus en détail Tegmark (1996), un ensemble entier est souvent beaucoup plus simple que chacun de ses membres. Par exemple, le contenu informationnel algorithmique d'un entier générique n est de l'ordre de $\log_2 n$ (Chaitin 1987), le nombre de bits nécessaires pour l'écrire en binaire.

De même, l'ensemble de toutes les solutions fluides parfaites des équations d'Einstein présente une complexité algorithmique moindre qu'une solution particulière générique, car le premier est spécifié par quelques équations seulement, tandis que la seconde exige la spécification d'une grande quantité de données initiales sur une hypersurface. En termes simples, le contenu informationnel apparent augmente lorsque l'on se concentre sur un élément particulier d'un ensemble, perdant ainsi la symétrie et la simplicité inhérentes à la totalité des éléments pris ensemble. En ce sens, les multivers de niveau supérieur présentent une complexité algorithmique moindre. Passer de notre univers au multivers de niveau I élimine la nécessité de spécifier les conditions initiales ; passer au niveau II élimine la nécessité de spécifier les constantes physiques ; et le multivers de niveau IV, composé de toutes les structures mathématiques, est dépourvu de complexité algorithmique. Puisque cette richesse d'information et cette complexité n'existent réellement que dans la perspective subjective des observateurs, une théorie du multivers est sans doute plus économique qu'une théorie attribuant une existence physique à un seul élément de l'ensemble (Tegmark 1996).

Le deuxième reproche fréquemment formulé à l'encontre des multivers est leur étrangeté. Cette objection est d'ordre esthétique plutôt que scientifique et, comme mentionné précédemment, n'a de sens que dans le cadre de la vision aristotélicienne du monde. Dans le paradigme platonicien, on pourrait s'attendre à ce que les observateurs trouvent étrange la théorie correcte de l'univers si la perspective de l'oiseau différait suffisamment de celle de la grenouille, et tout porte à croire que c'est le cas pour nous.

Cette étrangeté perçue n'a rien de surprenant, puisque l'évolution ne nous a dotés d'une intuition que pour la physique quotidienne qui assurait la survie de nos lointains ancêtres. Grâce à des inventions ingénieuses, nous avons entrevu un peu plus que la perspective de la grenouille de notre vision interne habituelle, et, de fait, nous avons rencontré des phénomènes bizarres dès que nous nous éloignons de l'échelle humaine : à grande vitesse (le temps ralentit), à petite échelle (les particules quantiques peuvent se trouver à plusieurs endroits simultanément), à grande échelle (trous noirs), à basse température (l'hélium liquide peut s'écouler vers le haut), à haute température (les particules en collision peuvent changer d'identité), etc.

De ce fait, les physiciens admettent généralement que les perspectives de la grenouille et de l'oiseau sont très différentes. Une conception moderne répandue de la théorie quantique des champs considère le modèle standard comme une simple théorie effective, une limite de basse énergie d'une théorie encore à découvrir, encore plus éloignée de nos concepts classiques rassurants (impliquant par exemple des cordes en 10 dimensions). Nombre d'expérimentateurs se lassent de produire autant de résultats expérimentaux « étranges » (mais parfaitement reproductibles) et acceptent simplement que le monde soit plus étrange que nous le pensions, poursuivant ainsi leurs calculs.

Nous avons constaté que les quatre niveaux de multivers ont en commun le fait que la théorie la plus simple et sans doute la plus élégante implique par défaut des univers parallèles, et qu'il faut complexifier la théorie en y ajoutant des processus non étayés expérimentalement et des postulats *ad hoc* (espace fini, effondrement de la fonction d'onde, asymétrie ontologique, etc.), pour expliquer l'existence des univers parallèles. Notre

jugement esthétique se résume donc à ce que nous jugeons le plus superflu et inélégant : la multitude de mondes ou la profusion de mots. Peut-être nous habituerons-nous peu à peu aux bizarreries de notre cosmos, et finirons-nous même par trouver son charme dans cette étrangeté.

Remerciements : L'auteur tient à remercier Anthony Aguirre, Aaron Classens, Angelica de Oliveira-Costa, George Musser, David Raub, Martin Rees, Harold Shapiro et Alex Vilenkin pour leurs échanges stimulants. Ces travaux ont été financés par les subventions AST-0071213 et AST-0134999 de la NSF, les subventions NAG5-9194 et NAG5-11099 de la NASA, une bourse de la Fondation David et Lucile Packard et une bourse Cottrell de Research Corporation.

VI. RÉFÉRENCES

Anglin, J. R., & Zurek, W. H. (1996). Decoherence in quantum systems. *Physical Review D*.

Barbour, J. B. (2001). *The End of Time*. Oxford University Press.

Barrow, J. D. (1991). *Theories of Everything*. Ballantine.

Barrow, J. D. (1992). *Pi in the Sky*. Clarendon Press.

Barrow, J. D., & Tipler, F. J. (1986). *The Anthropic Cosmological Principle*. Clarendon Press.

Brundrit, G. B. (1979). Parallel universes. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*.

Bucher, M. A., & Spergel, D. N. (1999). Inflation and cosmology. *Scientific American*.

Carter, B. (1974). Large number coincidences and the anthropic principle. *IAU Symposium*.

Chaitin, G. J. (1987). *Algorithmic Information Theory*. Cambridge University Press.

Davies, P. C. W. (1982). *The Accidental Universe*. Cambridge University Press.

Davies, P. (1993). *The Mind of God*. Touchstone.

Davies, P. (1996). *Are We Alone?* Basic Books.

Deutsch, D. (1997). *The Fabric of Reality*. Allen Lane.

Deutsch, D. (2003). Parallel universes. In *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology, and Complexity*. Cambridge University Press.

DeWitt, B. (2003). Quantum mechanics and reality. In *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology, and Complexity*. Cambridge University Press.

Egan, G. (1995). *Permutation City*. Harper.

Garriga, J., & Vilenkin, A. (2001a). Many worlds in one. *Physical Review D*.

Garriga, J., & Vilenkin, A. (2001b). Eternal inflation. *Physical Review D*.

Giulini, D., Joos, E., Kiefer, C., Kupsch, J., Stamatescu, I. O., & Zeh, H. D. (1996). *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Springer.

Guth, A., & Steinhardt, P. J. (1984). The inflationary universe. *Scientific American*.

Hawking, S. (1993). *A Brief History of Time*. Touchstone.

Lewis, D. (1986). *On the Plurality of Worlds*. Blackwell.

Linde, A. (1994). The inflationary universe. *Scientific American*.

Maldacena, J. (2003). The AdS/CFT correspondence. In *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology, and Complexity*. Cambridge University Press.

Nozick, R. (1981). *Philosophical Explanations*. Harvard University Press.

Rees, M. J. (2002). *Our Cosmic Habitat*. Princeton University Press.

Rucker, R. (1982). *Infinity and the Mind*. Birkhäuser.

Schmidthuber, J. (1997). *A Computer Scientist's View of Life, the Universe, and Everything*. Springer.

Smolin, L. (1997). *The Life of the Cosmos*. Oxford University Press.

Steinhardt, P. J., & Turok, N. (2002). A cyclic universe. *Science*.

Tegmark, M. (1996). Does the universe in fact contain almost no information? *Foundations of Physics Letters*.

Tegmark, M. (1997). On the dimensionality of spacetime. *Classical and Quantum Gravity*, 14, L69.

Tegmark, M. (1998). Is "the theory of everything" merely the ultimate ensemble theory? *Annals of Physics*.

Tegmark, M. (2000). Importance of quantum decoherence. *Physical Review E*.

Tegmark, M. (2002). Parallel universes. *Science*.

Tegmark, M., & Wheeler, J. A. (2001). 100 years of quantum mysteries. *Scientific American*.

Wigner, E. P. (1967). *Symmetries and Reflections*. MIT Press.

Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.

Zeh, H. D. (1970). On the interpretation of measurement. *Foundations of Physics*.

Zurek, W. (2003). Decoherence and the transition from quantum to classical. In *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology, and Complexity*. Cambridge University Press.